

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR)
و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) در کاوش‌های
باستان‌شناسی، مطالعه موردی تپه حصار دامغان

دانشجو:

ارژنگ رشمه کریم

اساتید راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر علیرضا عرب امیری

استاد مشاور:

علی اکبر رجبی

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰

تقدیم بہ

پدر و مادر مہ کہ زندگیم را مدیون آنہا، مستم

و دوستانم

تشکر و قدر دانی

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکر اندرش مزید نعمت

کمتر کاری است که بدون کمک گرفتن و مشورت دیگران به سرمنزل مقصود تواند رسید و رسم معرفت بر این است که چون به منزل رسی شکر یاران را به جای آری. این پایان نامه نیز مستثنی از این مهم نبوده است. بدین جهت بر خود لازم می دانم که از اساتید راهنمای بزرگواریم آقایان دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عربامیری سپاسگذاری کنم که بدون زحمات، راهنمایی ها و پی گیری آنان انجام این پایان نامه ممکن نبود. همچنین به جاست که از دوستان خوبم آقایان اکبر شریفی، امین عسگری، فرج الله مؤمنی، کیانوش سلیمانی، امید اسدیان، یوسف عسگری نژاد، امیر ملاجان و خانمها نازیلا هاشمی، مرضیه حاجی محمدی و فاطمه نعیمی و همچنین جناب آقای مهندس زارعی مسئول آزمایشگاه ژئوفیزیک که در عملیات برداشت داده ها دلسوزانه و بدون هیچ چشم داشتی مرا یاری نمودند تشکر و قدر دانی کنم.

تعهد نامه

اینجانب ارژنگ رشمه کریم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک دانشکده معدن نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کاربرد روش های ژئوفیزیکی رادار نفوذی به زمین (GPR) و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی (ERT) در کاوش های باستان شناسی، مطالعه موردی تپه حصار دامغان تحت راهنمایی دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی و دکتر علیرضا عربامیری متعهد می شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد .

چکیده:

باستان‌ژئوفیزیک یکی از زیرشاخه‌های ژئوفیزیک کاربردی است که با استفاده از روش‌های گوناگون ژئوفیزیکی به اکتشاف آثار باستانی مدفون در زمین می‌پردازد. سرعت بالای انجام عملیات‌های ژئوفیزیکی، هزینه کم در مقایسه با دیگر روش‌های اکتشافی، نتایج قابل اعتماد، غیرمخرب بودن این روش‌ها و موفقیت‌آمیز بودن کاربرد آنها در کاوش‌های باستان‌شناسی باعث شده که توجه باستان‌شناسان به ژئوفیزیک جلب شده و کاربرد آن در کاوش‌های باستانی روزافزون شود.

توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه (ERT) یکی از روش‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی است؛ که در آن با بهره‌جستن از یک شبکه متراکم برداشت، تعداد زیادی نقطه در دو راستای جانبی و قائم اندازه‌گیری می‌شوند. این روش در مقایسه با روش‌های مرسوم برداشت‌های ژئوالکتریک سریع‌تر بوده، تصاویر نهایی از وضوح بالاتری برخوردار است و نتایج دقیق‌تر هستند. به همین دلیل به کارگیری این روش در کاوش‌های باستان‌شناسی می‌تواند بسیار سودمند باشد.

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) نیز با فرستادن امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا به زمین و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت موج در گیرنده شکل هندسی، ابعاد، عمق قرارگیری اهداف زیرسطحی و موقعیت فصل مشترک‌ها را در اعماق کم مشخص می‌کند و در نتیجه می‌تواند در بررسی‌های باستان‌شناسی بسیار مؤثر باشد.

در این تحقیق سعی شده است با تلفیق نتایج هر دو روش ERT و GPR، علاوه بر رسیدن به دیدی واضح‌تر از زیرسطح و تفسیری دقیق‌تر، کارایی دو روش در کاوش‌های باستانی در تپه حصار دامغان بررسی و نقاط قوت و ضعف آنها نیز با یکدیگر قیاس شود.

با توجه به ویژگی‌های محدوده مورد مطالعه فرض بر این بود که اگر بنایی در زیر سطح مدفون باشد، با توجه به متراکم‌تر بودن بنا نسبت به محیط دربرگیرنده احتمالاً مقاومت‌ویژه آن بیشتر از محیط

اطرافش خواهد بود. این تباینی است که در برداشت‌های الکتریکی مورد نظر است. همچنین اگر این فرض درست باشد سرعت میرایی امواج GPR در محیط دربرگیرنده بیشتر از بنای مدفون خواهد بود. این امر در مقاطع به صورت بخش‌های با عمق نفوذ کمتر مشخص می‌شود. در صورتی که در زیر زمین حفره‌ای وجود داشته باشد (مثل کوره یا قبر) باز هم این حفره دارای مقاومت ویژه‌ای به مراتب بیشتر از اطراف است و تباین خصوصیات الکترومغناطیسی آن نیز به میزان قابل توجهی با اطراف متفاوت خواهد بود. در هر دو حالت وجود بنا و یا حفره در زیرسطح، تباین فیزیکی مربوطه لازم بین هدف مدفون و مواد محصور کننده‌اش برای هر دو روش ژئوفیزیکی وجود خواهد داشت.

پس از طراحی شبکه منظم سه‌بعدی برداشت، برداشت‌ها انجام و بررسی‌های دو و سه‌بعدی صورت گرفت. نتایج هر دو روش با یکدیگر در هماهنگی بوده و حاکی از وجود دو آنومالی با شکل هندسی منظم در قسمت جنوب‌غربی محوطه برداشت و بافت رس ریز دانه محصور کننده آنومالی‌های مذکور می‌باشد. با توجه به شکل هندسی و ابعاد آنومالی‌های مذکور احتمال می‌رود که آنها ناشی از وجود دو دیوار متقاطع مدفون باشند. دیوارهای مدفون در روش ERT با مقاومت ویژه بالا و شکل هندسی مشخص و محیط دربرگیرنده با مقاومت ویژه پایین مشاهده می‌شود. در روش GPR دیوارها به صورت بخش‌های با عمق نفوذ بیشتر نسبت به اطراف قابل تمیز هستند. در حالت مقایسه‌ای روش GPR بسیار سریع‌تر از روش ERT است. هرچند به دلیل رسانایی بالای محیط، عمق نفوذ GPR به شدت کاهش پیدا کرده است. در این بررسی روش ERT علاوه بر شناسایی اعماق بیشتر قدرت تفکیک بالاتری نیز نسبت به روش GPR داشته است.

واژگان کلیدی:

رادار نفوذی به زمین، توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی، سازه باستانی مدفون

مقاله مستخرج از پایان نامه:

استفاده از روش رادار نفوذی به زمین (GPR) در کاوش های باستان شناسی، مطالعه موردی سایت

باستانی تپه حصار دامغان

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- مروری بر مطالعات انجام شده ۳
- ۳-۱- اهداف و ضرورت انجام تحقیق ۵
- ۴-۱- ساختار پایان نامه ۶

فصل دوم: مبانی روش مقاومت ویژه الکتریکی و برداشت‌های توموگرافی الکتریکی

- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- خواص مواد ۸
- ۳-۲- مقاومت‌سنجی الکتریکی ۹
- ۱-۳-۲- آرایش‌های الکترودی ۱۱
- ۴-۲- توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی ۱۲
- ۵-۲- مدل سازی ۱۴
- ۱-۵-۲- مدل سازی مستقیم ۱۵
- ۲-۵-۲- مدل سازی معکوس ۱۶
- ۶-۲- معایب روش مقاومت ویژه الکتریکی و توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی ۲۰

فصل سوم: اصول اولیه روش رادار نفوذی به زمین

- ۱-۳- مقدمه ۲۲
- ۲-۳- اساس فیزیکی ۲۳

- ۲۳..... ۱-۲-۳- معادلات ماکسول
- ۲۳..... ۲-۲-۳- خواص مواد
- ۲۴..... ۲-۲-۳- الف گذردهی
- ۲۶..... الف-۱ گذردهی نسبی
- ۲۸..... ۲-۲-۳- ب نفوذپذیری مغناطیسی
- ۲۸..... ۲-۲-۳- ج رسانندگی الکتریکی
- ۲۹..... ۳-۲-۳- انتشار امواج الکترومغناطیسی
- ۳۲..... ۴-۲-۳- امپدانس امواج و پخش شدگی سیگنال
- ۳۳..... ۳-۳- فرضیات رایج در برداشت‌های GPR
- ۳۳..... ۴-۳- آنتن‌ها و قطبش
- ۳۳..... ۱-۴-۳- اساس قطبش
- ۳۴..... ۲-۴-۳- قطبش آنتن
- ۳۷..... ۵-۳- روش‌های برداشت داده‌های GPR
- ۳۷..... ۱-۵-۳- دورافت مشترک
- ۳۸..... ۲-۵-۳- نقطه عمق مشترک
- ۳۸..... ۳-۵-۳- برداشت‌های درون چاهی
- ۳۹..... ۶-۳- پردازش داده‌های GPR

- ۴۰.....Dewow فیلتر ۱-۶-۳
- ۴۰..... فیلتر پایین گذر ۲-۶-۳
- ۴۱..... فیلتر بالاگذر ۳-۶-۳
- ۴۲..... فیلتر قائم ۴-۶-۳
- ۴۲..... بهره زمانی ۵-۶-۳
- ۴۳..... الف کنترل بهره اتوماتیک ۵-۶-۳
- ۴۴..... ب بهره گسترش و جبران نمایی ۵-۶-۳
- ۴۴..... ج بهره اتوماتیک ۵-۶-۳
- ۴۵..... واپیچش ۶-۶-۳
- ۴۵..... تصحیح مهاجرت ۷-۶-۳
- ۴۶..... مزایای GPR ۷-۳
- ۴۶..... محدودیت‌های GPR ۸-۳

فصل چهارم: برداشت، پردازش و تفسیر داده‌ها

- ۴۹..... مقدمه ۱-۴
- ۴۹..... پیشینه تاریخی ۲-۴
- ۵۲..... برداشت، پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها ۳-۴
- ۵۴..... اندازه‌گیری داده‌های ERT ۱-۳-۴

۵۶..... ۲-۳-۴- مدل سازی و تفسیر داده‌های ژئوالکترونیک

۶۴..... ۳-۳-۴- برداشت داده‌های GPR

۶۴..... ۴-۳-۴- پردازش و تفسیر داده‌های GPR

۷۷..... ۴-۴- مقایسه نتایج حاصل از دو روش ERT و GPR

فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۷۹..... ۱-۵- نتیجه‌گیری

۸۱..... ۲-۵- پیشنهادات

۸۲..... منابع و مراجع

۸۶..... پیوست الف: معرفی نرم‌افزار Win_EKKO Pro

۹۱..... پیوست ب: معرفی نرم‌افزار EKKO_Mapper

۹۴..... پیوست ج: معرفی نرم‌افزار Transform

فهرست شکل‌ها

فصل دوم

- شکل ۱-۲: شمایی از مدار الکتریکی تشکیل شده در روش مقاومت ویژه..... ۹
- شکل ۲-۲: شمایی از تزریق جریان الکتریکی به زمین و اندازه‌گیری مقاومت آن..... ۱۰
- شکل ۳-۲: آرایش‌های رایج در برداشت‌های مقاومت ویژه و فاکتورهای هندسی‌شان..... ۱۱
- شکل ۴-۲: شمایی از آرایش الکترودها برای یک برداشت دو بعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و دستگاه‌های مورد نیاز آن..... ۱۳

فصل سوم

- شکل ۱-۳: شمایی از نحوه انتشار موج الکترومغناطیس توسط فرستنده و بازتاب و ثبت آن در گیرنده..... ۲۲
- شکل ۲-۳: رابطه بین مؤلفه حقیقی و موهومی گذردهی ۲۶
- شکل ۳-۳: شمایی از مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی و راستای انتشار موج الکترومغناطیس..... ۳۱
- شکل ۴-۳: نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده بصورت پهلو به پهلو. E در صفحه‌ای افقی، عمود بر صفحه قائم تابش قرار دارد (آرایش EH)..... ۳۵
- شکل ۵-۳: فرستنده و گیرنده در امتداد هم قرار گرفته و E در صفحه قائم تابش قرار دارد (آرایش EV)..... ۳۶
- شکل ۶-۳: شمایی از برداشت انعکاسی و نتیجه برداشت بصورت مقطع فاصله-زمان..... ۳۷
- شکل ۷-۳: شمایی از برداشت نقطه عمق مشترک ۳۸

شکل ۳-۸: شمایی از برداشت درون چاهی ۳۹

شکل ۳-۹: فرآیند کلی برداشت، پردازش و نمایش داده‌های GPR ۴۰

شکل ۳-۱۰: شمایی از نحوه عملکرد فیلتر پایین‌گذر ۴۱

شکل ۳-۱۱: شمایی از نحوه عملکرد فیلتر بالاگذر ۴۱

شکل ۳-۱۲: شمایی از مدل زمین لایه‌ای با افق‌های بازتاب‌کننده یکسان ولی با میزان افت‌های

متفاوت ۴۲

شکل ۳-۱۳: مفهوم بهره جبران خطی و نمایی ۴۴

فصل چهارم

شکل ۴-۱: نقشه ایران و مکان سایت باستانی تپه حصار در شهر دامغان ۵۰

شکل ۴-۲: عکس هوایی از محوطه مورد مطالعه و ترانشه‌های حفر شده ۵۳

شکل ۴-۳: برداشت داده‌های مقاومت ویژه ۵۴

شکل ۴-۴: محوطه برداشت، نقشه برداری شده ۵۵

شکل ۴-۵: تفاوت میان نتایج حاصل از دو روش معکوس‌سازی متفاوت الف) استوار ب)

هموارسازی ۵۷

شکل ۴-۶: آنومالی‌های مشخص شده در پروفیل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ ۵۸

شکل ۴-۷: آنومالی‌های مشخص شده در پروفیل‌های ۶ و ۷ ۵۹

- شکل ۴-۸: نمایش سه بعدی نتایج حاصل از معکوس‌سازی روش استوار الف) اثر بلوک‌های جانبی وارد شده است ب) اثر بلوک‌های جانبی لحاظ نشده است ۶۰
- شکل ۴-۹: نمایش سه بعدی نتایج حاصل از معکوس‌سازی روش هموارسازی الف) اثر بلوک‌های جانبی وارد شده است ب) اثر بلوک‌های جانبی لحاظ نشده است ۶۱
- شکل ۴-۱۰: نمایش سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه به همراه خطوط هم مقاومت و سطح هم مقاومت ۶۲
- شکل ۴-۱۱: نمایش مقاطع ژئوالکتریک در کنار یکدیگر و موقعیت آنها نسبت به ترانشه‌ها در نرم‌افزار SketchUp ۶۳
- شکل ۴-۱۲: شبکه برداشت داده‌های GPR ۶۵
- شکل ۴-۱۳: مقطع پروفیل صفر بدون اعمال فیلتر ۶۶
- شکل ۴-۱۴: مقطع پروفیل شماره صفر پس از اعمال فیلترهای Dewow و بهره اتوماتیک ۶۷
- شکل ۴-۱۵: مقطع پروفیل صفر پس از اعمال بهره AGC با عرض پنجره ۲ و بیشترین بهره اعمالی ۵۰۰ ۶۸
- شکل ۴-۱۶: مقطع پروفیل شماره صفر پس از اعمال بهره SEC با ضریب تضعیف ۱۰ و بیشترین بهره ۵۰۰ و فیلتر قائم با عرض پنجره ۳ نقطه ۶۸
- شکل ۴-۱۷: مقطع پروفیل شماره صفر پس از اعمال فیلترهای Dewow، بهره اتوماتیک، و فیلتر پایین‌گذر و بالاگذر ۶۹
- شکل ۴-۱۸: مقطع پروفیل شماره صفر پس از اعمال فیلترهای Dewow، بهره اتوماتیک، فیلتر بالاگذر، فیلتر پایین‌گذر و تصحیح مهاجرت ۷۰

- شکل ۴-۱۹: تفاوت بخش‌های با عمق نفوذ کم و عمق نفوذ زیاد در مقاطع GPR..... ۷۱
- شکل ۴-۲۰: مقاطع حاصل از روش GPR در مقایسه با مقاطع ژئوالکتریک متناظرشان..... ۷۲
- شکل ۴-۲۱: برش‌های عمقی داده‌های GPR..... ۷۳
- شکل ۴-۲۲: محوطه برداشت و مکان دیوارهای احتمالی مدفون در زیر سطح..... ۷۴
- شکل ۴-۲۳: نمایش سه بعدی داده‌های GPR در نرم‌افزار T3D..... ۷۴
- شکل ۴-۲۴: نمایش پنج مقطع از داده‌های برداشت شده در نرم‌افزار T3D..... ۷۵
- شکل ۴-۲۵: مقایسه مقاطع بدست آمده از دو نرم‌افزار الف) Win_EKKO_Pro ب) EKKO_3D..... ۷۵
- شکل ۴-۲۶: مقایسه برش عمقی بدست آمده از دو نرم‌افزار الف) EKKO_3D ب) EKKO Mapper..... ۷۶

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: گذردهی نسبی برخی از مواد زمین و سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی در آنها..... ۲۷

فصل اول

کلیات

در برداشت‌های مقاومت‌ویژه، جریان الکتریکی در یک منبع مولد جریان (باطری یا ژنراتور) تولید شده و به وسیله دو الکتروود به زمین تزریق می‌شود. با استفاده از دو الکتروود دیگر اختلاف پتانسیل بوجود آمده اندازه‌گیری می‌شود. از آنجایی که مواد مختلف ظرفیت‌های متفاوتی در عبور دادن جریان الکتریکی از خود دارند، در نتیجه پتانسیل‌های متفاوتی اندازه گرفته می‌شود. با محاسبه مقاومت‌ویژه از پتانسیل‌های ثبت شده و ترسیم آنها می‌توان به جنس لایه‌ها و مواد زیرسطحی پی برد.

در روش رادار نفوذی به زمین (GPR)^۱ امواج الکترومغناطیسی با فرکانس‌های بالا (۱۰۰۰MHz-۱۰) در آنتن فرستنده تولید می‌شود. این امواج در زیر سطح منتشر شده و پس از برخورد به لایه‌ها و اشیائی که دارای خصوصیات الکترومغناطیسی متفاوتی هستند، بازتابیده و در گیرنده ثبت می‌شوند.

در این تحقیق سعی شد تا با به کارگیری هر دو روش در محوطه‌ای باستانی که فاقد هرگونه نشانه سطحی دال بر وجود سازه‌ای در زیر سطح بود، در زمانی نسبتاً کوتاه، با دقتی قابل قبول و با ایجاد کمترین تغییر در محیط مورد بررسی اطلاعاتی از زیر سطح بدست آورد. علاوه بر اینکه، بدین طریق می‌توان قابلیت این روش‌ها را در کاوش‌های باستانی بررسی کرد و با کنار هم قرار دادن نتایج هر دو روش اطمینان به تفسیر را افزایش داد. در ضمن نقاط قوت و ضعف هر روش نیز شناسایی می‌شود.

^۱ Ground Penetrating Radar

۱-۲- مروری بر مطالعات انجام شده

مقالات بسیار زیادی در زمینه استفاده از روش‌های توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی (ERT)^۱ و GPR بطور مجزا و یا تلفیقی در زمینه‌های گوناگون از قبیل چینه‌شناسی، بررسی‌های زیست‌محیطی، زمین-شناسی مهندسی، باستان‌شناسی و ... وجود دارد. در اینجا تنها به مرور چند نمونه از موارد استفاده ترکیبی و انفرادی این روش‌ها در کاوش‌های باستانی اشاره می‌شود.

رادار نفوذی به زمین نخست، به عنوان روشی، اکتشافی برای تعیین مکان اشیاء مدفون و فضاهای خالی مانند لوله‌ها و تونل‌ها توسعه یافت (Fullagar & livleybrooks, 1994). همچنین از GPR برای مشخص کردن سنگ‌شناسی، گسل‌ها و سیستم درزه‌ها؛ بررسی واحدهای مدفون خاک (Doolittle, 1982) و عمق آب‌زیرزمینی (Overmeeren, 1994) استفاده شد.

یکی از اولین کاربردهای GPR در باستان‌شناسی، در سال ۱۹۷۵ در سایت چاکو کانیون^۲ در نیومکزیکو آمریکا انجام شد (Vickers et al., 1976). هدف از این مطالعه، اکتشاف محل دیوارهای احتمالی در اعماق کمتر از یک متر بود. بعد از موفقیت‌های بدست آمده در این سایت کاربرد GPR در سال ۱۹۷۹ در هالا سلطان تکه^۳ واقع در قبرس (Fisher et al., 1980) و سایت باستانی سرن^۴ کشور السالوادور (Sheets et al., 1985) ادامه یافت (Conyers & Goodman, 2004).

روش مقاومت‌ویژه الکتریکی اولین بار در سال ۱۹۲۰ توسط برادران شلومبرگر ابداع شد (Koefoed, 1979) و اولین کاربرد آن در باستان‌شناسی به سال ۱۹۴۶ میلادی باز می‌گردد (Aitken, 1974). این روش به طور موثری برای اکتشاف منابع آب زیرزمینی، بررسی انواع آلودگی آب‌های زیرزمینی،

¹ Electrical Resistivity Tomography (ERT)

² Chaco Canyon

³ Hala Sultan Tekke

⁴ Ceren

آشکارسازی محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها و مناطق خردشده، در مسائل مهندسی و کاربردهای متنوع دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرد (Reynolds, 1997).

از موارد موفقیت آمیز استفاده از این روش‌ها در سال‌های اخیر می‌توان به بررسی‌های ژئوفیزیکی سطحی یک تپه‌مقبره^۱ به وسیله روش ERT سه‌بعدی در سایت باستانی ویرجینا^۲ در شمال یونان (Papadopoulos et al., 2010)، استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی ترکیبی برای تعیین مشخصات سایت باستانی کلیسای ماسنزویو^۳ در شهر رم ایتالیا (Cardarelli & Filippo, 2009)، بررسی‌های ژئوفیزیکی کم عمق با استفاده از روش‌های مغناطیس‌سنجی و GPR در سایت باستانی سن میگوئل تکیلا^۴، حوزه آبریز مکزیکو (Arciniega-Ceballos et al., 2009) و بررسی‌های الکتریکی و GPR در سایت باستانی پالو بلانکو^۵ واقع در شمال غربی آرژانتین (Martino et al., 2006) اشاره نمود.

از موارد استفاده این روش‌ها در ایران نیز می‌توان به استفاده از تلفیق دو روش مقاومت‌ویژه و GPR در شناسایی قنات در منطقه شاهرود (اسحاقی، ۱۳۸۸؛ محمدی ویژه، ۱۳۸۷) و همچنین استفاده از روش GPR به همراه مغناطیس‌سنجی در بررسی آثار باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک به سطح در قصرشیرین توسط اویسی مؤخر و همکاران (۱۳۸۴) اشاره کرد.

¹ Tumuli

² Virgina

³ Massenzio Basilica

⁴ San Miguel Tocuila

⁵ Palo Blanco

۱-۳- اهداف و ضرورت انجام تحقیق

استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در کاوش‌های باستانی در چند دهه اخیر در دنیا رو به رشد بوده و با گذر زمان این روش‌ها در حال تبدیل به یکی از ابزار معمول در کاوش‌های باستانی هستند. در حالی که در کشور ما باستان‌شناسان چندان با این روش‌ها آشنا نبوده و فقط در چند مورد محدود از روش مغناطیس‌سنجی (امین‌پور، ۱۳۸۶؛ محمدخانی، ۱۳۸۳) و مغناطیس‌سنجی و رادار (اویسی مؤخر و همکاران، ۱۳۸۴) در کاوش‌های باستانی استفاده کرده‌اند.

با توجه به پیشینه غنی تاریخی کشور و وجود تعداد قابل توجه مکان‌ها و محوطه‌های باستانی که کشف نشده و یا بطور کامل مورد کاوش قرار نگرفته‌اند و با در نظر گرفتن کند و هزینه‌بر بودن روش‌های معمول مورد استفاده در کاوش‌های باستان‌شناسی (عمدتاً حفاری)، حتی شناسایی بخشی از این مکان‌ها نیز نیازمند صرف سال‌ها وقت و هزینه‌های هنگفت است. از طرفی با در نظر گرفتن موفقیت روش‌های ژئوفیزیکی در تعیین محل و گستره ساختارهای مدفون، بدون هیچ‌گونه آسیب رسانی به محوطه باستانی یا ساخت‌های مدفون در زمانی بسیار کوتاه‌تر و با هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به حفاری‌های اکتشافی، معرفی این روش‌ها به باستان‌شناسان با هدف به‌کارگیری آنها در کاوش‌های باستانی کشور، امری ضروری به نظر می‌رسد.

تحقیق حاضر با اهداف فوق و همچنین مطالعه و مقایسه نتایج حاصل از هر دو روش، شناسایی نقاط قوت و ضعف هر کدام از آنها در شرایط محوطه باستانی انجام شد.

۱-۴- ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش رو مشتمل بر پنج فصل است. در فصل اول (فصل حاضر) به توضیحات کلی درباره روش‌ها، مرور کارهای انجام گرفته قبلی و هدف از انجام آنها پرداخته شده است. فصل دوم به معرفی روش‌های مقاومت‌ویژه و ERT می‌پردازد. در این فصل مزایا و معایب هر یک از این روش‌ها بیان شده، روش‌های برداشت مرسوم معرفی گردیده و در نهایت به منظور نتیجه‌گیری مطلوب از برداشت، انواع روش‌های مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. فصل سوم به بررسی روش GPR، کاربردهای این روش، تئوری انتشار امواج الکترومغناطیس و مراحل پردازش رایج بر روی داده‌های آن اختصاص داده شده است. فصل چهارم به معرفی منطقه مورد مطالعه، نحوه و دلیل طراحی شبکه، برداشت داده‌ها، پردازش و تفسیر آنها اختصاص دارد. در نهایت در فصل پنجم نتیجه‌گیری و پیشنهادات مرتبط با این تحقیق آمده است.

فصل دوم: مبانی روش
مقاومت ویژه الکتریکی و
برداشتهای توموگرافی
الکتریکی

برداشت‌های مقاومت‌ویژه با کوبیدن چهار الکتروود در زمین انجام می‌شود؛ جریان الکتریکی (جابجایی یون‌ها و الکترون‌ها در محیط رسانا) به وسیله دو الکتروود در زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل حاصل توسط دو الکتروود دیگر اندازه‌گیری می‌شود. بدین طریق رسانندگی الکتریکی^۱ (σ) (و عکس آن مقاومت‌ویژه الکتریکی^۲ (ρ)) خاک، رسوبات و سازه‌های احتمالی باستانی زیرسطح اندازه‌گیری می‌شود. با توجه به چند عامل که مهمترین آنها فاصله الکتروودها از یکدیگر در سطح زمین است، می‌توان تخمینی از عمق سازه‌ها و مواد زیرسطحی داشت. به دلیل اینکه خاک‌ها و مواد مدفون ظرفیت‌های متفاوتی در هدایت جریان الکتریکی دارند، تغییرات مقاومت‌ویژه در زیر زمین می‌تواند بیانگر حضور اشیایی در آن باشد. زمانی که یک سری اندازه‌گیری بصورت شبکه‌ای انجام می‌شود و نتایج آن بصورت نقشه رسم می‌شود، آنومالی‌هایی که ممکن است معرف اشیاء زیرسطحی باشند آشکار خواهند شد (Conyers & Goodman, 2004).

۲-۲- خواص مواد

مواد مختلف زمین (سنگ‌ها، خاک‌ها، رسوبات و ...) با توجه به کانی‌های تشکیل دهنده‌شان، میزان تخلخل، سیال محتوی و درصد اشباع از آب دارای مقاومت‌ویژه‌های متفاوتی هستند. لایه‌های زمین از مواد متفاوتی تشکیل شده است. در نتیجه، این لایه‌ها نیز دارای مقاومت‌ویژه‌های متفاوتی هستند. با بدست آوردن مقاومت‌ویژه‌های متفاوت زیرسطح از طریق اندازه‌گیری‌های سطحی می‌توان به جنس مواد و علاوه بر آن به زمین‌شناسی لایه‌های زیرسطحی پی برد.

¹ Conductivity

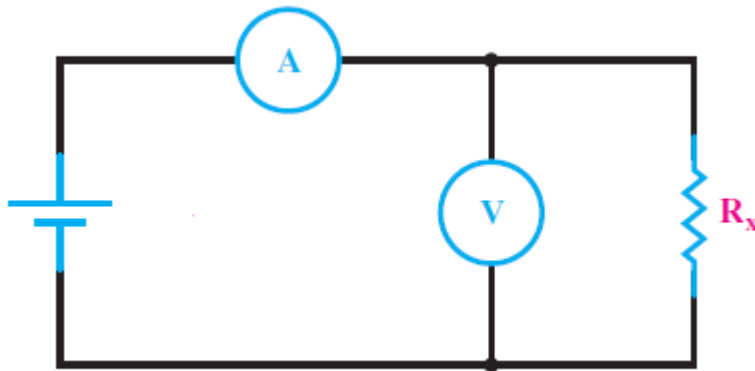
² Resistivity

۳-۲- مقاومت سنجی الکتریکی

اصل اولیه حاکم بر روش مقاومت ویژه الکتریکی، قانون اهم است (معادله ۱-۲). در این روش، یک مدار الکتریکی تشکیل داده می شود که زمین در آن حکم مقاومت را دارد (شکل ۱-۲).

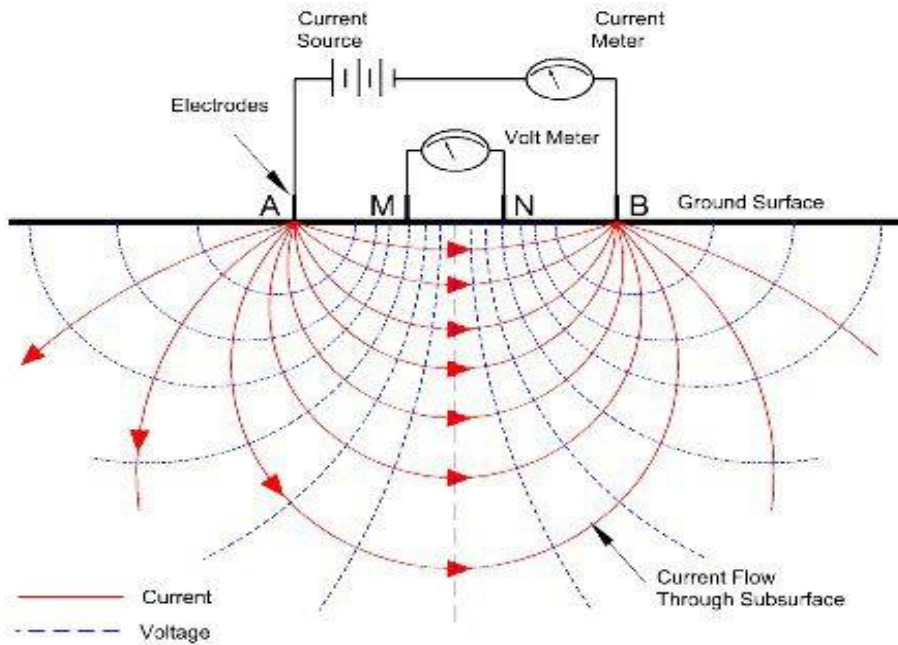
$$R = \frac{\Delta V}{I} \quad (1-2)$$

در رابطه فوق، I شدت جریان ارسالی (بر حسب آمپر)، ΔV اختلاف پتانسیل قرائت شده (بر حسب ولت) و R مقدار مقاومت زمین (بر حسب اهم) می باشد.



شکل ۲-۱: شمایی از مدار الکتریکی تشکیل شده در روش مقاومت ویژه الکتریکی (قیطرانی، ۱۳۸۷)

در این روش مطابق شکل ۲-۲، جریان الکتریکی به وسیله دو الکترود (A، B) که به آنها الکترودهای جریان گفته می شود، به زمین تزریق شده و اختلاف پتانسیل حاصل از طریق دو الکترود دیگر (M، N) که با نام الکترودهای پتانسیل شناخته می شوند؛ اندازه گیری می شود (Mooney, 1980).



شکل ۲-۲: شمایی از نحوه تزریق جریان الکتریکی به زمین و اندازه‌گیری مقاومت آن (<http://www.nga.com>)

با قرائت از روی سطح، مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده و از ضرب مقاومت و فاکتور هندسی (k) مقاومت ویژه حاصل می‌شود. فاکتور هندسی ضریبی است که با توجه به نحوه قرارگیری الکترودها نسبت به یکدیگر (آرایش الکترودی) تعیین می‌شود.

$$\rho_a = kR \quad (2-2)$$

که در آن،

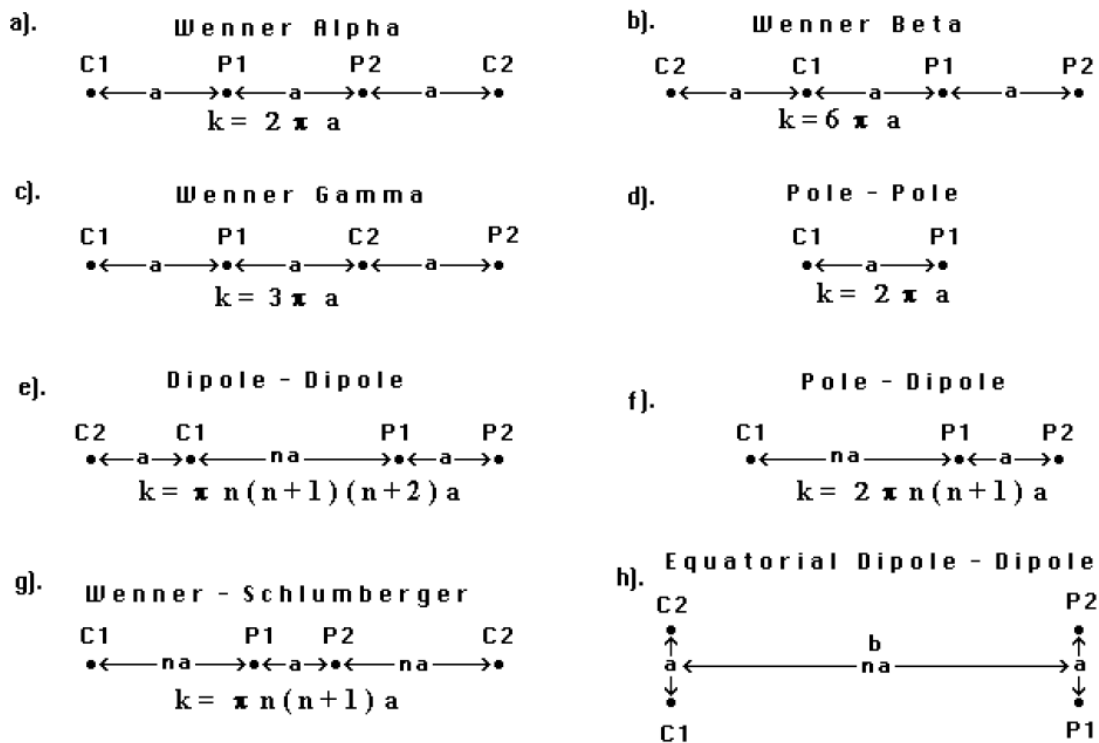
ρ_a ($\Omega.m$): مقاومت ویژه ظاهری

k (m): فاکتور هندسی

$$k = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{r_{AM}} + \frac{1}{r_{BM}} + \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}\right)} \quad (3-2)$$

۲-۳-۱- آرایش‌های الکترودی

با توجه به نحوه قرارگیری الکترودها نسبت به یکدیگر، آرایش‌های الکترودی متفاوتی وجود دارد. هر یک از این آرایش‌ها، دارای نقاط قوت و ضعفی هستند که با توجه به این خصوصیات، هر آرایش کاربردهای خاص خود را دارد. در شکل ۲-۳ تعدادی از آرایش‌های الکترودی رایج و فاکتور هندسی آنها آمده است.



شکل ۲-۳: آرایش‌های رایج در برداشت‌های مقاومت ویژه و فاکتورهای هندسی‌شان (Loke, 2004)

آرایش الکترودی شلومبرگر به تغییرات مقاومت ویژه در راستای عمق حساس است و به تغییرات جانبی حساسیت چندانی ندارد؛ به همین دلیل این آرایش بیشتر در سونداژنی استفاده می‌شود. آرایش الکترودی ونر به تغییرات مقاومت ویژه در راستای جانبی حساس است و تغییرات عمقی مقاومت ویژه،

تأثیر چندانی بر مقادیر اندازه‌گیری شده این آرایه ندارد (Loke, 2004). در بررسی‌های باستانی آرایه دوقطبی-دوقطبی به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات جانبی مقاومت‌ویژه، بیش از سایر آرایه‌ها مورد توجه است.

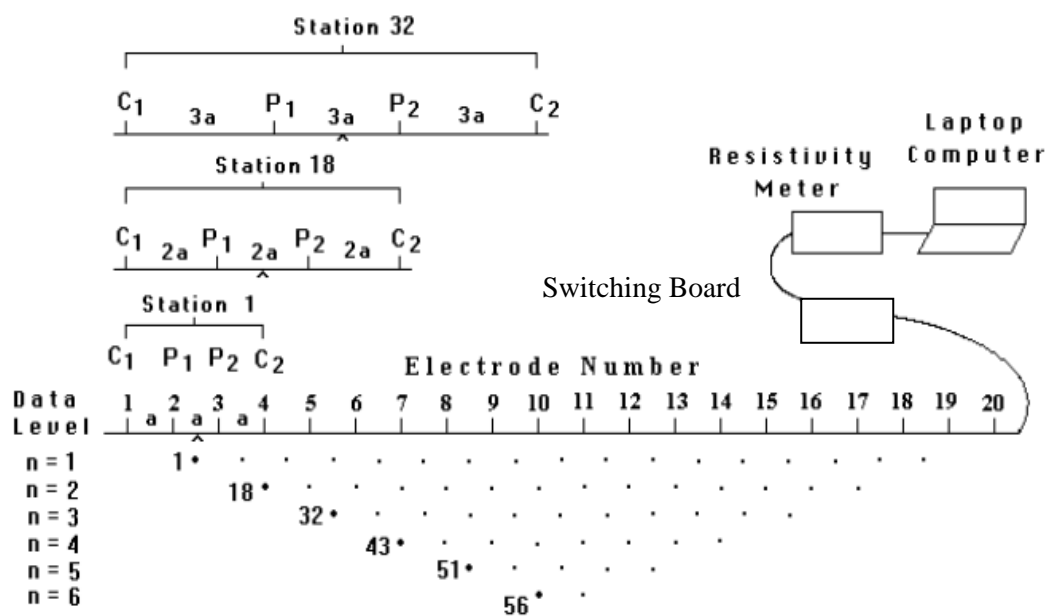
۲-۴ - توموگرافی مقاومت‌ویژه الکتریکی

در روش‌های معمول برداشت‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی، تعدادی الکتروود در زمین کوبیده می‌شود. از این تعداد، چهار الکتروود از طریق چهار رشته سیم به دستگاه سنجش مقاومت‌ویژه^۱ متصل می‌شوند. بسته به نوع آرایش، پس از اتمام یک قرائت و برای انجام قرائت بعدی، ممکن است سیم‌ها به یک، دو، سه و یا چهار الکتروود دیگر اتصال یابند. خارج کردن الکتروودهای قبلی و وارد کردن الکتروودهای جدید به مدار با استفاده از نیروی انسانی صورت می‌گیرد. به عنوان مثال اگر روش پروفیل‌زنی با آرایه ونر و فاصله الکتروودی ۵۰ متر ($a=50m$) مورد استفاده باشد؛ برای انجام هر قرائت نیاز است تا هر چهار الکتروود ۵۰ متر جابه‌جا شوند. بدیهی است که این امر نیازمند متوقف کردن برداشت برای انتقال دادن سیم‌ها یا الکتروودها به مدت زمان نسبتاً طولانی است، و از آنجا که جابه‌جایی‌ها توسط انسان صورت می‌گیرد، احتمال بروز خطا و وارد شدن الکتروودی دیگر به مدار و در نهایت برداشت داده غلط وجود دارد. دخالت نیروی انسانی در برداشت‌ها باعث پایین بودن سرعت برداشت، بروز خطا، صرف زمان و هزینه اضافی و در مجموع پایین بودن کارایی شیوه‌های رایج برداشت مقاومت‌ویژه الکتریکی است.

¹ Resistivity Meter

با عنایت به پیشرفت‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری بوجود آمده در علوم رایانه‌ای و دستگاه‌های الکترونیکی، روش‌های مورد استفاده در ژئوفیزیک بهبود یافته‌اند. برداشت‌های مقاومت-ویژه الکتریکی نیز به نوبه خود از این پیشرفت‌ها بی‌بهره نبوده و بهینه شده‌اند.

همان‌طور که در شکل ۲-۴ دیده می‌شود در روش ERT یک کابل چند رشته‌ای^۱ جایگزین سیم‌های متصل‌کننده الکترودها به دستگاه مقاومت‌سنج شده و دستگاه تعویض الکترودها^۲ نیز به سیستم برداشت اضافه شده است.



Sequence of measurements to build up a pseudosection

شکل ۲-۴: شمایی از آرایش الکترودها برای یک برداشت دو بعدی توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی و دستگاه‌های مورد نیاز آن (Loke, 2004)

¹ Multi Core Cable
² Switching Board

سیستم برداشت بدین صورت است که؛ تعداد زیادی الکتروود (از ۲۰ تا ۱۲۴ عدد) در زمین قرار داده شده و همگی آنها به یک کابل چندرشته‌ای متصل می‌شوند؛ کابل به واحد تعویض الکتروودها که خود متصل به دستگاه مقاومت‌سنج چند کاناله وصل است، مرتبط است. برای هر قرائت واحد تعویض الکتروودها چهار الکتروود را وارد مدار کرده، دستگاه مقاومت‌سنج اندازه‌گیری را انجام می‌دهد. سپس چهار الکتروود دیگر بصورت خودکار توسط واحد تعویض الکتروودها وارد مدار می‌شوند.

در ERT بیشتر زمان صرف کوبیدن الکتروودها به زمین، پهن کردن کابل و اتصال الکتروودها به کابل می‌شود. بیشترین زمان در حین برداشت نیز صرف انتظار دستگاه برای اندازه‌گیری می‌شود. مزیت استفاده از واحد تعویض الکتروودها این است که، زمان لازم برای تعویض الکتروودها بین هر قرائت زمانی بسیار کم و حداکثر چند ثانیه است. از آنجا که نیروی انسانی در جابه‌جایی الکتروودها دخالت ندارد، در نتیجه احتمال اتصال الکتروود اشتباه به کابل نیز منتفی است؛ لذا زمان و هزینه لازم برای برداشت یک پروفیل بطور چشم‌گیری کاهش می‌یابد. با استفاده از واحد تعویض الکتروودها و کابل چند رشته‌ای می‌توان یک پروفیل را با بیش از یک آرایه برداشت کرد در نتیجه حجم و کیفیت داده‌های برداشت شده بیشتر خواهد بود و نتیجه نهایی کیفیت و دقت بالاتری خواهد داشت.

۲-۵- مدل‌سازی

با مشخص بودن اختلاف پتانسیل (ΔV)، شدت جریان (I) و معلوم بودن آرایش الکتروودی (k)، مقاومت ویژه (ρ) محاسبه می‌شود. این اندازه‌گیری بر روی یک زمین همگن و همسانگرد با آرایش‌های الکتروودی متفاوت جواب یکسانی دارد. ولی اگر اندازه‌گیری بر روی زمینی ناهمگن صورت گیرد، با تغییر آرایش الکتروودی مقادیر اندازه‌گیری شده نیز تغییر خواهد کرد (Loke, 2004). نتیجه حاصل از این اندازه‌گیری ارتباط تنگاتنگی با آرایش الکتروودها دارد و کمیت اندازه‌گیری شده مقاومت-ویژه ظاهری (ρ_a) خوانده می‌شود.

با استفاده از معادله (۲-۲) مقاومت ویژه ظاهری (ρ_a) محاسبه می‌شود. برای حذف اثر آرایش الکترودی و مشخص کردن مقاومت واقعی (ρ_t) نقاط برداشت شده، نیاز به فرآیند مدل‌سازی است. مدل، بیان ریاضی ایده‌آلی از مقطعی از زمین است. یک مدل متشکل از پارامترهایی است. این پارامترها کمیت‌های فیزیکی هستند که باید با استفاده از داده‌های برداشت شده تخمین زده شود. پاسخ‌های مدل داده‌های ساختگی هستند که از روابط ریاضی تعریف کننده مدل محاسبه می‌شوند. در همه روش‌های مدل‌سازی سعی بر آن است تا مدلی برای زیر سطح تعیین شود که، پاسخ‌هایی نزدیک به داده‌های برداشت شده داشته باشد. بطور کلی مدل‌سازی به دو روش مستقیم^۱ (پیشرو) و معکوس^۲ (پسرو) انجام می‌شود (Loke, 2004).

۲-۵-۱- مدل‌سازی مستقیم

در مدل‌سازی پیشرو ورودی فرآیند مدل‌سازی یک مدل آزمون (فرضی) از زمین می‌باشد و در طی فرآیند با توجه به معادلات حاکم بر مسئله، داده‌های (پاسخ) مربوط به این مدل محاسبه شده و به عنوان خروجی مدل ارائه می‌شود. این عمل با اصلاح مدل (تغییر پارامترها) آنقدر ادامه پیدا می‌کند تا پاسخ مدل برازش خوبی با داده‌های صحرائی پیدا کند. یعنی از مدل به داده‌ها می‌رسیم.

مدل‌سازی پیشرو بر مبنای روش آزمون و خطا انجام می‌شود. در این روش یک توزیع خاص برای اجزاء زیرسطحی در نظر گرفته می‌شود و در قدم اول فضای زیرسطحی به تعداد زیادی سلول تقسیم می‌شود. سپس پاسخ این مدل تحت آرایش الکترودی مورد نظر محاسبه می‌شود.

^۱Forward
^۲Inverse

۲-۵-۲- مدل سازی معکوس

در مدل سازی معکوس سعی می شود تا با توجه به داده های برداشت شده، مدل تخمین زده شود. بقیه مراحل مدل سازی معکوس همانند مدل سازی پیشرو می باشد. در واقع تفاوت مدل سازی معکوس با مدل سازی مستقیم در نحوه انتخاب مدل اولیه است. انتخاب مدل در روش معکوس کمی سخت تر است ولی پاسخ های حاصل به واقعیت نزدیکتر بوده، همچنین تعداد دفعات تکرار برای کاهش خطا کمتر می باشد. بدلیل پیچیده تر بودن مدل در روش معکوس، زمان لازم برای محاسبه پاسخ های مدل و حجم حافظه اشغالی بیشتر است (Loke, 2004).

در روش مقاومت ویژه الکتریکی پارامترهای مدل، مقادیر مقاومت ویژه سلول های مدل و داده ها، مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده هستند. رابطه ریاضی بین پارامترهای مدل و پاسخ آنها از روش های تفاضل محدود^۱ (Dey & Morrison, 1979a; Dey & Morrison, 1979b) و یا اجزاء محدود^۲ (Silvester & Ferrari, 1990) فراهم می شود.

در تمامی روش های بهینه سازی، مدل اولیه در فرآیندی تکرار شونده طوری بهبود می یابد که اختلاف بین داده های برداشت شده و پاسخ های مدل کاسته شود. می توان داده های برداشت شده را بصورت بردار ستونی \mathbf{y} نمایش داد:

$$\mathbf{y} = \text{col}(y_1, y_2 \dots y_m) \quad (۴-۲)$$

m تعداد قرائت ها است. پاسخ های مدل (f) را نیز می توان به طریق مشابهی نشان داد

$$\mathbf{f} = \text{col}(f_1, f_2 \dots f_m) \quad (۵-۲)$$

پارامترهای مدل بصورت بردار زیر ارائه می شوند

$$\mathbf{q} = \text{col}(q_1, q_2 \dots q_n) \quad (۶-۲)$$

^۱ Finite Difference Method

^۲ Finite Element Method

که n تعداد پارامترهای مدل است. تفاوت بین داده‌های برداشت شده و پاسخ‌های مدل از بردار تفاضل g که بصورت زیر است محاسبه می‌شود.

$$g = y - f \quad (7-2)$$

در روش بهینه سازی کمترین-مربعات، مدل اولیه طوری بهینه می‌شود که مجموع مربعات خطا (E) که تفاضل بین مقادیر پاسخ‌های مدل و داده‌های برداشت شده است، کمینه شود.

$$E = g^T g = \sum_{i=1}^n g_i^2 \quad (8-2)$$

برای کاهش مقدار خطا از معادله گاوس-نیوتن استفاده می‌شود، بدین وسیله پارامترهایی از مدل که باید تغییر کنند تا مجموع مربعات خطا (E) کاهش پیدا کند؛ مشخص شوند (Lines & Treitel, 1984).

$$J^T J \Delta q_i = J^T g \quad (9-2)$$

Δq بردار تغییرات پارامترهای مدل، و J ماتریس ژاکوبین (با اندازه $m \times n$) مشتقات جزئی است. عناصر ماتریس ژاکوبین بصورت $J_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial q_j}$ هستند که تغییر در i امین پاسخ مدل به دلیل تغییر در j امین پارامتر مدل است. پس از محاسبه بردار تغییر پارامتر (Δq)، مدل جدید از معادله (۲-۱۰) محاسبه می‌شود

$$q_{k+1} = q_k + \Delta q_k \quad (10-2)$$

بدلیل کاستی‌های معادله گاوس-نیوتن، این روش کمتر مورد استفاده قرار گرفته و در عوض از بهبود یافته آن با عنوان مارکواردت^۱ - لونبرگ^۲ استفاده می‌شود (Lines & Treitel, 1984).

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q = J^T g \quad (11-2)$$

¹Marquardt
²Levenberg

در معادله فوق J ماتریس هویت^۱ و λ فاکتور تعدیل^۲ است. این روش با عنوان رگرسیون ریج^۳ نیز شناخته می‌شود (Inman, 1975). در معکوس‌سازی داده‌های سونداژ که مدل از تعداد لایه‌های کمی تشکیل شده است، این روش به خوبی پاسخ می‌دهد. ولی در مواردی که پارامترهای مدل زیاد باشند، نظیر مدل‌های دو و یا سه بعدی، مدل تولید شده با روش رگرسیون ریج، توزیع مقاومت‌ویژه نامنظم همراه با مناطقی با مقاومت‌ویژه بسیار بالا یا پایین خواهد داشت (Constable et al., 1987). برای رفع این مشکل معادله کمترین مربعات گاوس-نیوتن بار دیگر بصورت معادله (۱۲-۲) بهینه شده، بطوری که تغییرات فضایی در پارامترهای مدل را کمینه می‌کند.

$$(J^T J + \lambda F) \Delta q_k = J^T - \lambda F q_k \quad (12-2)$$

$$F = \alpha_x c_x^T c_x + \alpha_y c_y^T c_y + \alpha_z c_z^T c_z$$

c_x ، c_y و c_z ماتریس‌های هموارسازی در جهات x ، y و z هستند. α_x ، α_y و α_z وزن‌های نسبی داده شده به فیلترهای هموارسازی در جهات یاد شده است. معادله فوق، مربع تغییرات فضایی یا سختی^۴ مقادیر مقاومت‌ویژه مدل را نیز کمینه می‌کند، در واقع این همان روش بهینه‌سازی هموارسازی^۵ یا l_2 norm است. روش مذکور مدلی با تغییرات تدریجی مقاومت‌ویژه تولید می‌کند. استفاده از این روش معکوس‌سازی برای مناطقی مناسب است که تغییرات زمین‌شناسی آنها بصورت تدریجی بوده و ناگهانی نباشد. در شرایطی که مناطقی در زیر سطح بصورت درونی همگن هستند ولی با محیط پیرامون خود متفاوت بوده و دارای مرزهای تند هستند، بهینه‌سازی معادله (۱۲-۲) که به l_1 norm یا روش معکوس‌سازی بلوکی معروف است جواب‌های به مراتب قابل قبول‌تری می‌دهد، که به صورت آتی است:

¹ Identity Matrix

² Damping Factor

³ Ridge Regression

⁴ Roughness

⁵ Smoothness-Constrain

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta q_k = J^T R_d g - \lambda F_R q_k \quad (13-2)$$

$$F = \alpha_x c_x^T R_m c_x + \alpha_y c_y^T R_m c_y + \alpha_z c_z^T R_m c_z$$

R_m و R_d ماتریس‌های وزنی هستند.

برای محاسبه مقاومت‌ویژه از معادلات ۲-۹، ۲-۱۱، ۲-۱۲ و ۲-۱۳ سه روش وجود دارد. (I) راه‌حل تحلیلی، (II) روش جزء مرزی و (III) روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود. روش تحلیلی دقیق‌ترین روش است. ولی استفاده از این روش محدود به چند شکل هندسی ساده (کره و استوانه) است. روش جزء مرزی از انعطاف پذیری بیشتری برخوردار است، اما در این روش نیز تعداد نواحی با مقدار مقاومت‌ویژه متفاوت محدود است (معمولاً کمتر از ۱۰ لایه). در بررسی‌های مهندسی و زیست‌محیطی می‌توان توزیع مقاومت‌ویژه در زیرسطح را بصورت اختیاری در نظر گرفت؛ در نتیجه روش‌های اجزاء محدود و تفاضل محدود تنها گزینه‌های کاربردی هستند. دو روش مذکور می‌توانند زیر سطح را به هزاران سلول با مقاومت‌ویژه‌های متفاوت تقسیم کنند (Loke, 2004).

۲-۶- معایب روش مقاومت ویژه و ERT

- تماس ضعیف الکترودها با زمین در زمین‌های بسیار خشک و مشکل بودن کوبیدن الکترودها تا عمق مناسب در زمین‌های سنگ لاهی.
- موفقیت روش به محدوده (حجم) نفوذ جریان بستگی دارد. اگر لایه اول بسیار مقاوم باشد برای تزریق جریان به زمین با مشکل مواجه خواهیم بود. همین طور اگر لایه اول رسانایی بالایی داشته باشد؛ جریان در لایه اول به دام خواهد افتاد. در هر دو صورت امکان اینکه اطلاعات زیادی از زیر سطح حاصل شود، وجود نخواهد داشت.
- اشتباهات حین برداشت (اتصال کوتاه، وصل کردن الکترودها اشتباه). البته در بیشتر اوقات قبل از وارد کردن داده‌ها می‌توان با نگاه کردن به آنها داده‌های ناشی از اشتباهات را حذف کرد.
- در برداشتهای مقاومت ویژه الکتريکی فرض بر این است که: تغییرات مقاومت ویژه در زیر سطح دویعدی است (فقط در راستای پروفیل و راستای عمقی). فواصل الکترودی بزرگتر نه تنها از اعماق بیشتر تاثیر می‌گیرند، بلکه اثر محیط اطراف خط برداشت نیز بر مقادیر اندازه‌گیری شده بیشتر خواهد بود. حال اگر در راستای عمود بر پروفیل، تغییرات مقاومت ویژه زیاد باشد، لایه‌های تحتانی مدل دچار اعوجاج می‌شوند.
- وضوح تصاویر روش مقاومت ویژه الکتريکی با افزایش عمق بصورت نمایی کاهش می‌یابد.

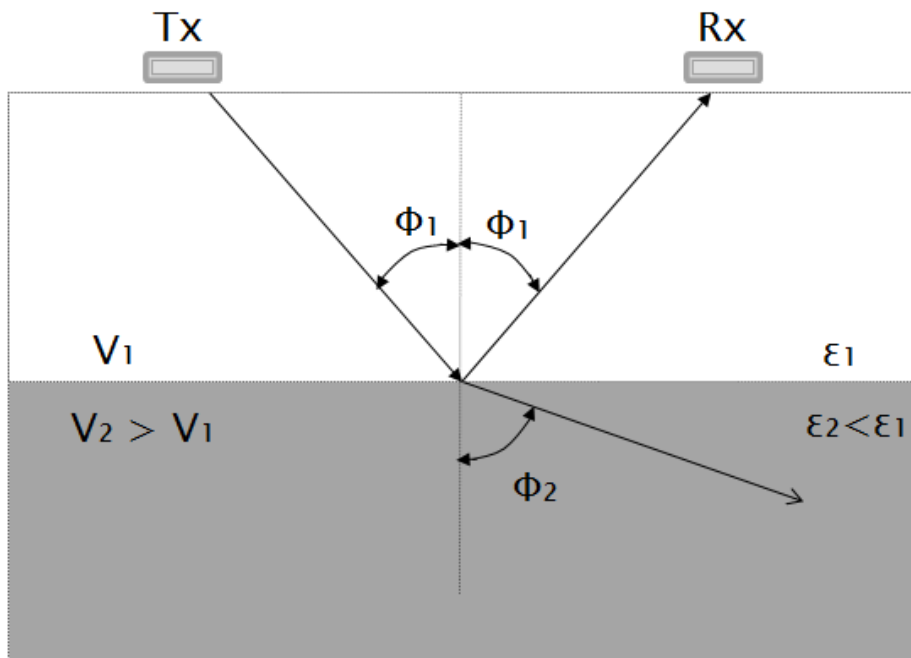
فصل سوم: اصول

اولیه روش رادار

نفوذی به زمین

۱-۳- مقدمه

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) براساس انتشار امواج الکترومغناطیسی به زمین، دریافت و ثبت امواج بازگشتی استوار است. دستگاه رادار از دو آنتن فرستنده و گیرنده تشکیل شده است. فرستنده امواجی با فرکانس‌های بالا (۱۰-۱۰۰۰MHz) تولید می‌کند. سرعت امواج منتشره در محیط با تغییر خصوصیات الکتریکی تغییر می‌یابد. این تغییر سرعت باعث شکست و یا بازتاب بخشی از موج می‌شود. انرژی بازتابیده توسط گیرنده دریافت و ثبت می‌گردد (شکل ۱-۳).



شکل ۱-۳: شمایی از نحوه انتشار موج الکترومغناطیس توسط فرستنده و بازتاب و ثبت آن در گیرنده (Baker et al., 2007)

۳-۲-اساس فیزیکی

۳-۲-۱-معادلات ماکسول

درک معادلات ماکسول برای پی بردن به نحوه کار GPR از اهمیت اساسی برخوردار است. ارتباط بین خصوصیات الکترومغناطیسی مواد و انتشار امواج الکترومغناطیس بصورت کمی طبق روابط زیر بیان می‌شود (Baker et al., 2007):

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (1-3)$$

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (2-3)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = q \quad (3-3)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4-3)$$

در معادلات ذکر شده E بردار شدت میدان الکتریکی، B بردار چگالی شارمغناطیسی، H شدت میدان مغناطیسی، q چگالی بار الکتریکی و J بردار چگالی جریان الکتریکی است. معادلات ماکسول نشان می‌دهند که جریان الکتریکی تولید میدان مغناطیسی می‌کند و برعکس.

۳-۲-۲-خواص مواد

برای درک انتشار امواج GPR نخست لازم است خصوصیات الکتریکی و مغناطیسی مواد توضیح داده شود. متغیرهای اصلی در GPR ثابت‌های گذردهی نسبی (ϵ_r)، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) و هدایت

ویژه الکتریکی (σ) می‌باشند. رابطه بین گذردهی نسبی، نفوذپذیری مغناطیسی و شاخص انکسار بصورت زیر تعریف می‌شود (Griffith, 1981).

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon\mu}{\epsilon_0\mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r\mu_r} \quad (5-3)$$

که در آن:

n = شاخص انکسار، بدون بعد

ϵ = گذردهی (فاراد بر متر، F/m)

$\epsilon_0 = (8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m})$ گذردهی خلاء

$\epsilon_r =$ گذردهی نسبی ($\frac{\epsilon}{\epsilon_0}$)، بدون بعد

μ = نفوذپذیری مغناطیسی (هنری بر متر، H/m)

$\mu_0 = (4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m})$ نفوذپذیری مغناطیسی خلاء

$\mu_r =$ نفوذپذیری مغناطیسی نسبی ($\frac{\mu}{\mu_0}$)، بدون بعد

۳-۲-۲-الف- گذردهی

درک مفهوم گذردهی نیازمند این است که بدانیم به چه موادی دی‌الکتریک گفته می‌شود.

بیشتر مواد طبیعی زمین (سنگ، رسوبات، خاک، ...) دی‌الکتریک در نظر گرفته می‌شوند. موادی دی-

الکتریک هستند که در معادله (۳-۶) صدق کنند.

$$\frac{\sigma}{\omega\epsilon} < 0.01 \quad (6-3)$$

ω فرکانس زاویه‌ای برحسب رادیان بر ثانیه (Rad/s) و σ رسانندگی الکتریکی برحسب زیمنس بر متر (S/m) است. مواد دی‌الکتریک در پاسخ به یک میدان الکتریکی خارجی در خود انرژی ذخیره می‌کنند. همانند تغییر شکل و ذخیره انرژی مواد الاستیک در پاسخ به انرژی سینتیک خارجی (انتشار امواج لرزه‌ای).

گذردهی، قابلیت مواد در قطبیده شدن، حفظ قطبیدگی و ذخیره انرژی در پاسخ به میدان الکتریکی خارجی است (Olhoeft, 1998). زمانی که ماده‌ای در معرض یک میدان الکترومغناطیسی خارجی قرار گیرد، اتم‌های آن تحت تاثیر جهت‌گیری مولکولی، یا قطبش تداخلی قرار می‌گیرند (Powers, 1997). بارهای الکتریکی از یکدیگر جدا می‌شوند. بطوری که یک میدان الکترومغناطیسی داخلی شکل می‌گیرد و میدان خارجی را متعادل می‌کند؛ که نتیجه آن ذخیره انرژی در شبکه مولکولی ماده است. لازم به ذکر است که بخشی از انرژی در اثر حرکت بارها بصورت گرما و پخش-شدگی تلف می‌شود.

گذردهی، عددی مختلط است که هم شامل مؤلفه ذخیره انرژی (حقیقی) و هم مؤلفه اتلاف انرژی (موهومی) می‌شود. این دو مؤلفه نسبت به یکدیگر نود درجه ($\pi/2$) اختلاف فاز دارند. بخش حقیقی گذردهی (ϵ') اندازه‌ای از میزان قطبیدگی و انرژی ذخیره شده است.

$$\epsilon' = \epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad [\text{F/m}] \quad (7-3)$$

بخش حقیقی معمولاً مقادیری بین 8.9×10^{-12} تا 7.2×10^{-10} F/m دارد (Packard, 1992).

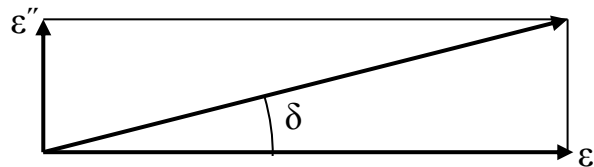
بخش موهومی (ϵ'') اندازه‌ای از میزان افت انرژی است و ارتباط آن با رسانندگی الکتریک بصورت زیر است:

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad [\text{F/m}] \quad (8-3)$$

مقدار مؤلفه موهومی معمولاً بین صفر و اندازه مؤلفه حقیقی است (Packard, 1992).

نسبت انرژی تلف شده به انرژی ذخیره شده معادل است با تانژانت زاویه افت (δ). رابطه بین انرژی ذخیره شده و انرژی تلف شده در شکل ۲-۳ دیده می‌شود:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_r \varepsilon_0} = \frac{1}{Q} \text{ [بدون بعد]} \quad (۹-۳)$$



شکل ۲-۳: رابطه بین مؤلفه موهومی و حقیقی گذردهی (Baker et al., 2007)

الف-۱- گذردهی نسبی

رابطه گذردهی نسبی با مؤلفه‌های حقیقی و موهومی آن بصورت زیر است:

$$\varepsilon_r = \left(\frac{\varepsilon'}{\varepsilon_0} - i \frac{\varepsilon''}{\varepsilon_0} \right) \text{ [بدون بعد]} \quad (۱۰-۳)$$

گذردهی نسبی، پارامتری اساسی در تعیین سرعت انتشار سیگنال و در نتیجه طول موج آن است. طول موج نیز در تعیین قدرت تفکیک داده‌های GPR نقش اساسی دارد. این روابط در معادلات (۳-۱) و (۳-۱۲) نشان داده شده‌اند. در جدول ۳-۱ مقادیر گذردهی نسبی برخی از مواد زمین و سرعت موج الکترومغناطیسی در آنها آورده شده است. لازم به ذکر است که این معادلات برای مواد با رسانندگی الکتریکی پایین و در فرکانس‌های بالا کاربرد دارند.

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \text{ [m/s]} \quad (۱۱-۳)$$

$$\lambda = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot \frac{1}{f} \text{ [m]} \quad (۱۲-۳)$$

که در آنها،

سرعت $v = (m/s)$

طول موج $\lambda = (m)$

سرعت نور در خلاء $c = (299792495 m/s)$

فرکانس $f = (Hz)$

جدول ۳-۱: گذردهی نسبی (ϵ_r) برخی از مواد زمین و سرعت موج الکترومغناطیسی در آنها (Baker et al., 2007)

ماده	ϵ_r	سرعت (m/ns)
هوا	۱	۰/۳
آب شور	۸۰	۰/۰۳
آب شیرین	۸۰	۰/۰۳
یخ آب شیرین	۳-۴	۰/۱۵-۰/۱۷
یخ آب شور	۴-۸	۰/۱۱-۰/۱۵
برف	۸-۱۲	۰/۰۹-۰/۱۱
ماسه، خشک	۴-۶	۰/۱۱-۰/۱۷
ماسه، مرطوب	۱۰-۳۰	۰/۰۵-۰/۰۹
ماسه سنگ، خشک	۲-۳	۰/۱۷-۰/۲۱
ماسه سنگ، مرطوب	۵-۱۰	۰/۰۹-۰/۱۳
سنگ آهک	۴-۸	۰/۱۱-۰/۱۵
شیل	۵-۱۵	۰/۰۸-۰/۱۳
رس	۱۵-۴۰	۰/۰۵-۰/۱۳
خاک، ماسه ای خشک	۴-۶	۰/۱۲-۰/۱۵
خاک، ماسه ای مرطوب	۱۵-۳۰	۰/۰۵-۰/۰۸
خاک، آلی خشک	۴-۶	۰/۰۵-۰/۰۸
خاک، آلی مرطوب	۱۵-۳۰	۰/۰۷-۰/۰۹
خاک، رسی خشک	۴-۶	۰/۱۲-۰/۱۵
خاک، رسی مرطوب	۱۰-۱۵	۰/۰۸-۰/۰۹
گرانیت	۴-۶	۰/۱۲-۰/۱۵
نمک، خشک	۴-۷	۰/۱۱-۰/۱۵

۳-۲-۲-ب- نفوذپذیری مغناطیسی

نفوذپذیری مغناطیسی اندازه‌ای از انرژی ذخیره و پراکنده شده در ماده‌ای است که در معرض میدان مغناطیسی خارجی قرار دارد (Powers, 1997). نفوذپذیری مغناطیسی (H/m) عددی مختلط است که شامل مؤلفه ذخیره انرژی (حقیقی) و مؤلفه اتلاف انرژی (موهومی) می‌شود.

مقدار نفوذپذیری مغناطیسی برای بیشتر خاک‌ها، سنگ‌ها و رسوبات غیرمغناطیسی، کوچک و تقریباً برابر با نفوذپذیری مغناطیسی خلاء ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$) است (Ulaby, 2001). مواد با تمرکز بالای اکسید آهن یا میزان بالای کانی‌های آهن‌دار از این قاعده مستثنی هستند. نفوذپذیری مغناطیسی نسبی بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ [بدون بعد]} \quad (۳-۱۳)$$

در بیشتر خاک‌ها و سنگ‌ها، μ تقریباً برابر با μ_0 ($\mu \approx \mu_0$) می‌باشد در نتیجه مقدار μ_r تقریباً برابر با واحد است. بنابراین معادلاتی که شامل μ_r هستند در هنگام برداشت در محیط‌های با میزان آهن کم ساده می‌شوند.

۳-۲-۲-ج- رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی بیانگر سهولت حرکت الکترون‌ها در یک ماده، تحت تاثیر میدان الکتریکی خارجی است (Saaranketo, 1998).

با افزایش رسانندگی محیط، عمق نفوذ شدت کاهش می‌یابد. در زمین رسانا، مؤلفه الکتریکی موج الکترومغناطیسی تضعیف می‌شود و از آنجا که دو مؤلفه الکتریکی و مغناطیسی موج یکدیگر را تغذیه

می‌کنند، اگر یکی از آنها تضعیف شود، دیگری نیز دچار تضعیف خواهد شد. در نتیجه کل موج، انرژی خود را از دست می‌دهد.

۳-۲-۳- انتشار امواج الکترومغناطیسی

انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک محیط، وابسته به فرکانس است. اگر فرکانس موج از فرکانس گذر^۱ (f_t) محیط کمتر باشد، القاء الکترومغناطیس و پخش‌شدگی انرژی رخ می‌دهد. انتشار امواج نوسانی الکترومغناطیس زمانی رخ می‌دهد که فرکانس موج الکترومغناطیسی از فرکانس گذر ماده بیشتر باشد.

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_r\epsilon_0} \quad (۱۴-۳)$$

قابل توجه است که فرکانس گذر هم به گذردهی نسبی و هم به رسانندگی الکتریکی وابسته است.

انتشار امواج الکترومغناطیسی زمانی رخ می‌دهد که ماده در معرض میدان الکترومغناطیسی قرار گرفته و در اثر میدان الکتریکی حاصل از موج بارهای الکتریکی ماده به حرکت درآیند. در نتیجه‌ی حرکت بارها، میدان داخلی متغیر با زمان به وجود می‌آید. زمانی که میدان ثانویه با میدان خارجی جفت شود، امواج GPR در ماده انتشار می‌یابند.

مفهوم دیگری به نام ثابت انتشار^۲ (γ) وجود دارد که شبیه به فرکانس گذر است.

$$\gamma = \sqrt{i\omega\mu(\sigma + i\omega\epsilon)} \quad (۱۵-۳)$$

انتشار موج الکترومغناطیسی هارمونیک با زمان در یک ماده همگن، وابسته به ثابت انتشار است (Olhoeft, 1998). در معادله فوق دیده می‌شود که پخش‌شدگی و انتشار موج الکترومغناطیسی

¹ Transition Frequency

² Propagation Constant

متغییر با زمان در محیط عاری از آهن ($\mu_r=1$) با رسانندگی الکتریکی، فرکانس زاویه‌ای و گذردهی نسبی تعیین می‌شود.

مواد بر اساس پاسخ‌شان به میدان‌های الکترومغناطیسی قابل شناسایی هستند. معادلات ذیل، معادلات ماکسول را به خصوصیات فیزیکی مواد مربوط می‌کند.

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (۱۶-۳)$$

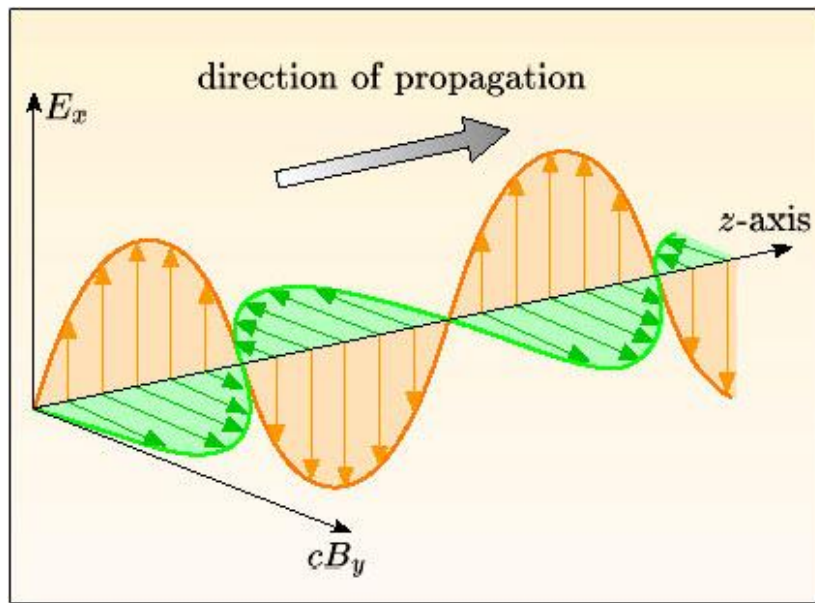
$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad (۱۷-۳)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (۱۸-۳)$$

همان‌طور که قبلاً گفته شد بیشتر مواد زمین غیرمغناطیسی هستند. بنابراین رسانندگی الکتریکی و گذردهی نسبی دو مشخصه فیزیکی با اهمیت بیشتر در بررسی‌های GPR هستند. میدان‌های الکتریکی، انتشار امواج الکترومغناطیسی را مستقیماً تحت تاثیر قرار می‌دهند. یک فرستنده الکترومغناطیسی تولید میدان الکتریکی می‌کند. بر طبق معادلات ماکسول این میدان ایجاد یک میدان مغناطیسی می‌کند؛ سپس میدان مغناطیسی حاصل میدان الکتریکی دیگری القاء می‌کند. تکرار این فرآیند موجب انتشار موج الکترومغناطیسی در محیط می‌شود. مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی موج الکترومغناطیس بر یکدیگر عمودند و راستای انتشار موج بر صفحه‌ای که این دو مؤلفه در آن قرار دارند عمود است (شکل ۳-۳). اگرچه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی بر یکدیگر عمودند، ولی موقعیت آنها نسبت به یکدیگر با گذر زمان تغییر می‌کند؛ که به آن قطبش دایره‌ای^۱ یا بیضوی^۲ گفته می‌شود. بیشتر آنتن‌های تجاری موج با قطبش خطی تولید می‌کنند؛ صفحه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نسبت به یکدیگر ثابت‌اند.

^۱ Circular Polarization

^۲ Elliptical Polarization



شکل ۳-۳ شمایی از مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی و راستای انتشار موج الکترومغناطیسی
(<http://openlearn.open.ac.uk>)

قطبش موج الکترومغناطیسی با توجه به جهت آنتن ممکن است در برخورد با مرز بین لایه‌ها تغییر کند. زمانی که آنتن‌ها در امتداد یکدیگر (— —) باشند قطبش موازی و هنگامی که موازی هم (| |) هستند قطبش عمودی دارند. اشیائی که موازی (در امتداد) آنتن‌ها هستند بازتاب‌های قوی‌تری تولید می‌کنند. درحالی‌که تشخیص اجسامی که در راستای عمود بر آنتن‌ها قرار دارند؛ سخت‌تر است. مشخصه‌های موج الکترومغناطیسی بازتاب شده از یک سطح وابسته به: جهت آنتن، خصوصیات الکتریکی بالا و پایین مرز و زاویه تابش (تابعی از جدایش آنتن‌ها و عمق مرز) است.

۳-۲-۴- امپدانس^۱ موج و پخش شدگی سیگنال

امپدانس معمولاً بصورت مقاومت کل (مقاومت و راکتانس)^۲ در برابر شارش جریان در یک

مدار القائی بیان می‌شود. امپدانس موج (Z_w) بیانگر نسبت میدان الکتریکی E به میدان مغناطیسی H است و بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$Z_w = \frac{E_x}{H_y} = \sqrt{\frac{i\omega\mu_r}{\sigma + i\omega\varepsilon_r}} \approx \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} [\Omega] \quad (19-3)$$

تقریب موجود در معادله (۱۹-۳) فقط در صورت وجود مواد دی الکتریک معتبر است.

میزان پخش شدگی انرژی یک موج الکترومغناطیسی در حال گذر از یک محیط بدون افت در

برخورد با یک فصل مشترک با زاویه قائمه، به وسیله ضریب بازتاب^۳ (R) (معادله ۲۰-۳) محاسبه می‌شود.

$$R = \frac{Z_{w2} - Z_{w1}}{Z_{w2} + Z_{w1}} [\text{بدون بعد}] \quad (20-3)$$

که در آن، R ضریب بازتاب در فصل جدایش و Z_{w1} و Z_{w2} امپدانس موج مواد بالا و پایین مرز هستند.

امپدانس موج، بر روی فاز سیگنال بازتابیده شده نیز اثر دارد. فاز سیگنال بازتابیده شده منفی

خواهد بود اگر، امپدانس در مرز کاهش پیدا کند (گذردهی نسبی افزایش یابد) و بالعکس فاز موج

بازگشتی مثبت خواهد بود اگر، سرعت و امپدانس موج در فصل مشترک افزایش یابند (گذردهی

نسبی کاهش یابد).

¹ Impedance

² Reactance

³ Reflection Coefficient

۳-۳- فرضیات رایج در برداشت‌های GPR

گرچه امواج GPR سه بعدی هستند؛ برای سهولت در محاسبات در اکثر کاربردهای GPR انتشار امواج الکترومغناطیسی بصورت دو بعدی در نظر گرفته می‌شود. هرچند این فرض در صورت انتشار موج در محیط‌های با ناهمگنی بالا غیر معتبر است.

تحلیل امواج GPR محدود به امواج الکترومغناطیسی است که در طیف فرکانسی عمل می‌کنند که، جریانات جابه‌جایی^۱ غالباًند و فرکانس‌های ارسالی بزرگ‌تر از فرکانس گذر هستند. این شرایط منجر می‌شود تا امواج الکترومغناطیسی در محیط انتشار و انعکاس یابند و القاء رخ ندهد. این فرض در مواد با نفوذپذیری مغناطیسی بالا صدق نمی‌کند.

در مطالعات GPR، بیشتر مواد زمین دی‌الکتریک و بدون اتلاف یا با میزان اتلاف انرژی کم در نظر گرفته می‌شوند. استفاده از GPR به عنوان یک تکنیک تصویر برداری انعکاسی در صورت نقض شدن هر یک از فرضیات فوق عملاً غیرممکن است. هر یک از سه فرض مطرح شده باید در تمامی برداشت‌های GPR در نظر گرفته شوند (Baker et al., 2007).

۳-۴- آنتن‌ها و قطبش

۳-۴-۱- اساس قطبش

در قطبش الکتریکی بارهای ثابت ماده دی‌الکتریک با میدان اعمال شده هم جهت می‌شوند. سه نوع قطبش الکتریکی وجود دارد؛ جهت گیری دوقطبی، یونی و الکتریکی. همان‌طور که قبلاً اشاره شد گذردهی نسبی قابلیت ماده در ذخیره انرژی در حضور میدان خارجی است. در نتیجه گذردهی- نسبی نشان‌دهنده سهولت قطبیدگی الکتریکی ماده است.

¹ Displacement Currents

یک موج الکترومغناطیسی در حال انتشار دارای چهار مشخصه اصلی دامنه، فرکانس، فاز و قطبش است. قطبش یک موج الکترومغناطیس مربوط می‌شود به بزرگی و تغییر جهت مؤلفه الکتریکی با زمان.

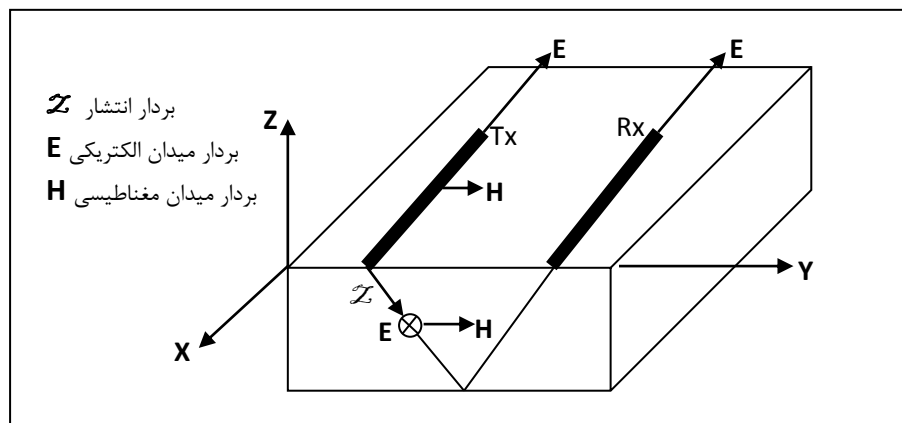
قطبش سیگنال GPR به سه عامل وابسته است: ساختمان آنتن، جهت آنتن و جهت قرارگیری هدف زیرسطحی. وابستگی سیگنال تابیده شده از آنتن به جهت، تاثیرات مهمی بر دامنه موج دریافتی در گیرنده دارد. هرچند که قطبش سیگنال دریافتی در گیرنده وابسته به خصوصیات زیرسطحی نیز هست.

۳-۴-۲- قطبش آنتن

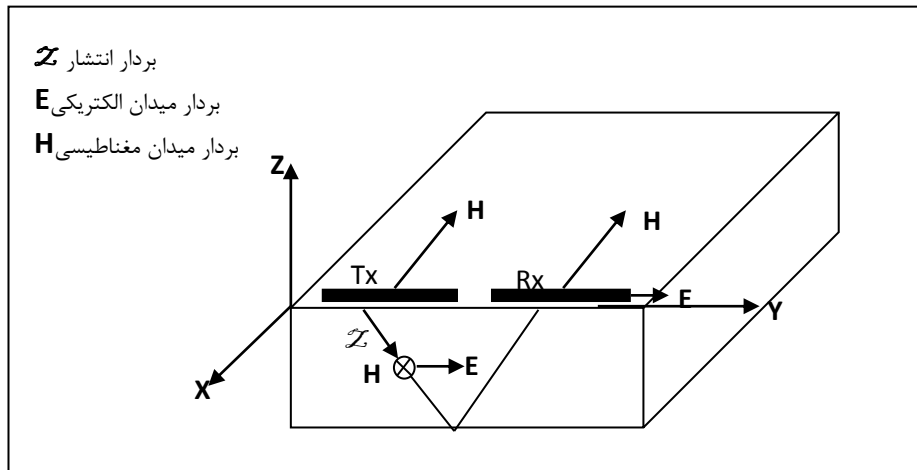
تمامی آنتن‌ها طوری طراحی می‌شوند که یکی از سه نوع قطبش خطی، دایره‌ای یا بیضوی را تولید کنند. بیشتر آنتن‌های تجاری موجود، موج با قطبش خطی تولید می‌کنند به طوری که E و H در یک صفحه‌ی هم‌فاز قرار دارند و بزرگی‌شان با زمان تغییر می‌کند. در موج قطبیده خطی، E با زمان تغییر جهت نمی‌دهد و تنها راه تغییر جهت E در یک محیط همگن، تغییر دادن جهت فرستنده یا گیرنده است. بنابراین جهت آنتن تاثیر مهمی بر قطبش موج دارد. قطبش امواج قطبیده خطی در اثر بازتابیده شدن از سطوح مختلف تغییر می‌کند. در اثر برخورد، موج قطبیده خطی به دو موج دیگر، با قطبش خطی تقسیم می‌شود. یکی از این دو موج، قطبیدگی موج تابیده را دارد و دیگری در جهت عمود بر قطبش اولیه قطبیده می‌شود. نتیجه این برخورد بازتابیده شدن یک موج با دو قطبش عمود برهم است. می‌توان درجه ناهمگنی فصل مشترک را بطور کیفی، از نسبت قطبش اولیه به ثانویه مشخص کرد (Baker et al., 2007).

قطبش موج خروجی از آنتن با توجه به موقعیت بردارهای E و H نسبت به صفحه قائم تابش تعیین می‌شود. بردار E در جهت محور طولی آنتن، و H در جهت عمود بر محور طولی آنتن است. شکل کلی جهت آنتن‌ها، صفحه قائم تابش، و جهت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در شکل‌های ۳-۴ و ۳-۵ نشان داده شده است.

دو نوع رایج از قطبش آنتن در برداشت داده‌های GPR وجود دارد. در نوع اول، E در صفحه‌ای افقی، عمود بر صفحه قائم تابش قرار دارد (شکل ۳-۴) این نوع قطبش EH نامیده می‌شود. در نوع دوم، بردار میدان الکتریکی در صفحه قائم تابش قرار دارد (شکل ۳-۵) و با نام EV شناخته می‌شود.



شکل ۳-۴: نحوه قرارگیری فرستنده و گیرنده بصورت پهلو به پهلو. E در صفحه‌ای افقی، عمود بر صفحه قائم تابش قرار دارد (آرایش EH) (Baker, et al, 2007).



شکل ۳-۵: فرستنده و گیرنده در امتداد هم قرار گرفته و E در صفحه قائم تابش قرار دارد (آرایش EV) (Baker, et al, 2007).

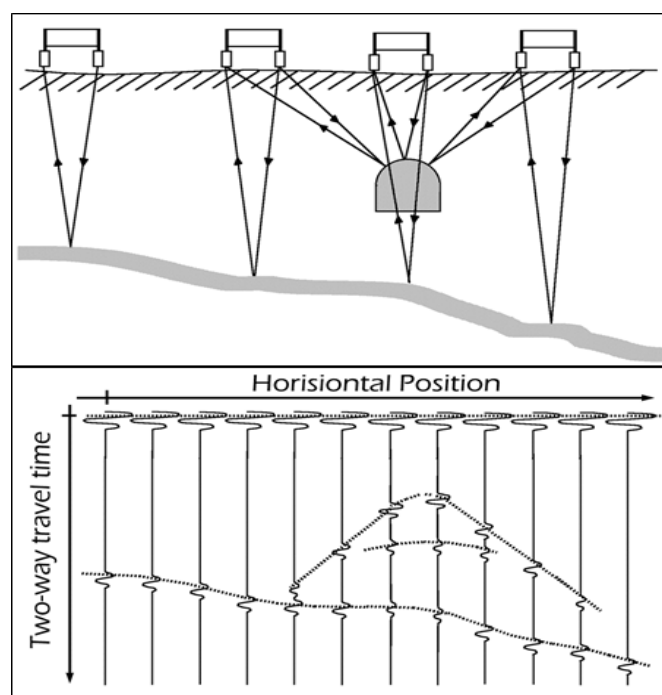
در بیشتر برداشت‌های GPR راستا و بزرگی E نسبت به وضعیت قرارگیری هدف زیرسطحی از اهمیت بیشتری برخوردار است تا راستا و جهت H . دانستن وضعیت قرارگیری هدف زیرسطحی و نحوه استفاده از آنتن برای تولید E در جهت مناسب، پیش از برداشت برای آشکار کردن اهداف گسترده یا ناپیوسته حائز اهمیت است (Baker et al., 2007).

۳-۵ روش‌های برداشت داده‌های GPR

عمده داده‌های GPR از طریق سه روش دور افت مشترک، نقطه عمق مشترک و به شکل درون چاهی برداشت می‌شوند.

۳-۵-۱- دورافت مشترک^۱

در این شیوه برداشت، فرستنده و گیرنده نسبت به هم ثابت بوده و هر دو در جهت خط برداشت حرکت داده می‌شوند. این شیوه برداشت به برداشت انعکاسی نیز معروف است. بیش از ۹۵٪ برداشت‌های GPR بدین طریق برداشت می‌شوند (شکل ۳-۶).

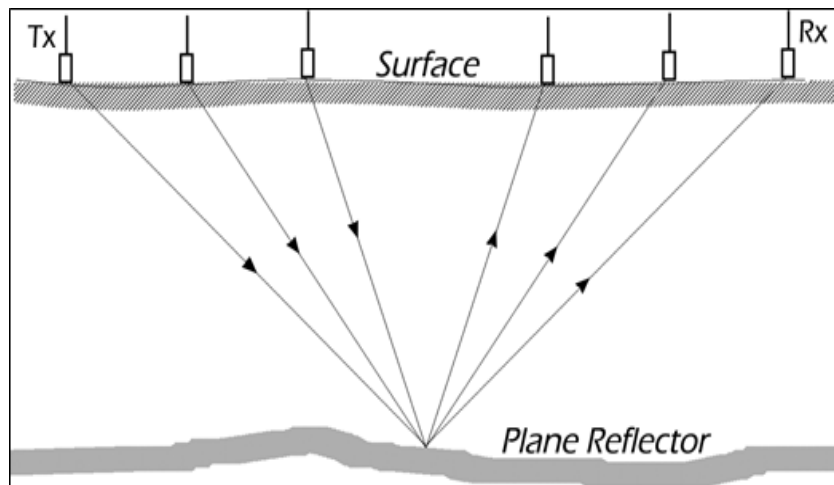


شکل ۳-۶: شمایی از برداشت انعکاسی و نتیجه برداشت بصورت مقطع فاصله-زمان
(<http://www.sigmateh.co.rs>)

¹ Common Offset

۳-۵-۲- برداشت نقطه عمق مشترک^۱

این برداشت‌ها به برداشت‌های انعکاس/انعکاس زاویه باز نیز معروف‌اند. در این نوع از برداشت داده، آنتن‌های گیرنده و فرستنده جدا از یکدیگر بوده و در دو طرف نقطه‌ای ثابت قرار می‌گیرند. در هربار برداشت، آنتن‌ها با فاصله مشخص از نقطه میانی دور می‌شوند. هدف از انجام این برداشت‌ها بدست آوردن سرعت در لایه‌های زیرسطحی برای تبدیل مقطع زمانی به مقطع عمقی است (شکل ۳-۷).



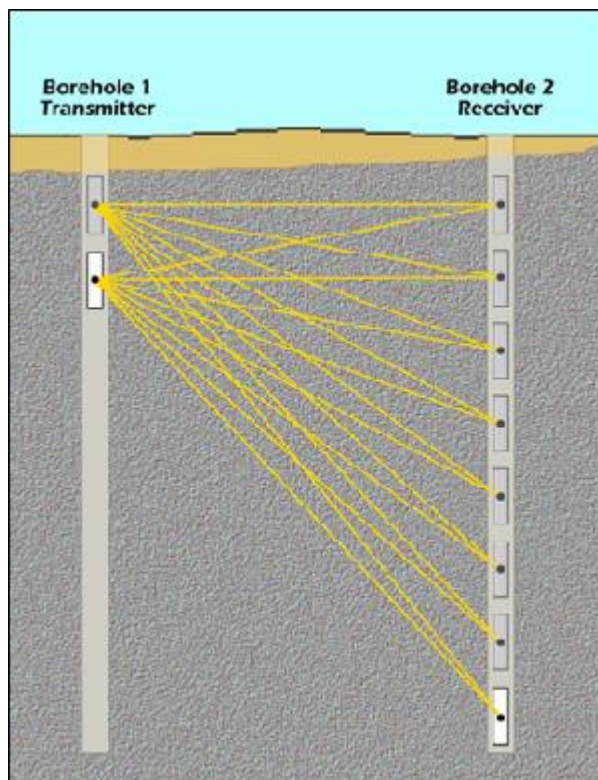
شکل ۳-۷: شمایی از برداشت نقطه عمق مشترک (<http://www.sigmatech.co.rs>)

۳-۵-۳ برداشت درون چاهی^۲

استفاده از این نوع آرایش به دلیل نیاز به پردازش‌های با دامنه گسترده و شرایط خاص عملیات، معمول نمی‌باشد. در این روش، آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دو طرف ساختار قرار می‌گیرند تا خصوصیتی مانند سرعت و تضعیف را اندازه‌گیری کنند. با توجه به مشخص بودن فاصله آنتن‌ها، سرعت موج در محیط محاسبه شده و از روی دامنه موج ورودی و دوره پالس GPR، اتلاف و پخش امواج در محیط محاسبه می‌گردد. در نهایت برای تبدیل این مقادیر به پارامترهای مورد نظر و تهیه توموگرام‌ها، پردازش‌های گسترده‌ای روی داده‌ها صورت می‌پذیرد (شکل ۳-۸) (Reynolds, 1997).

¹ Common mid-point

² Transillumination

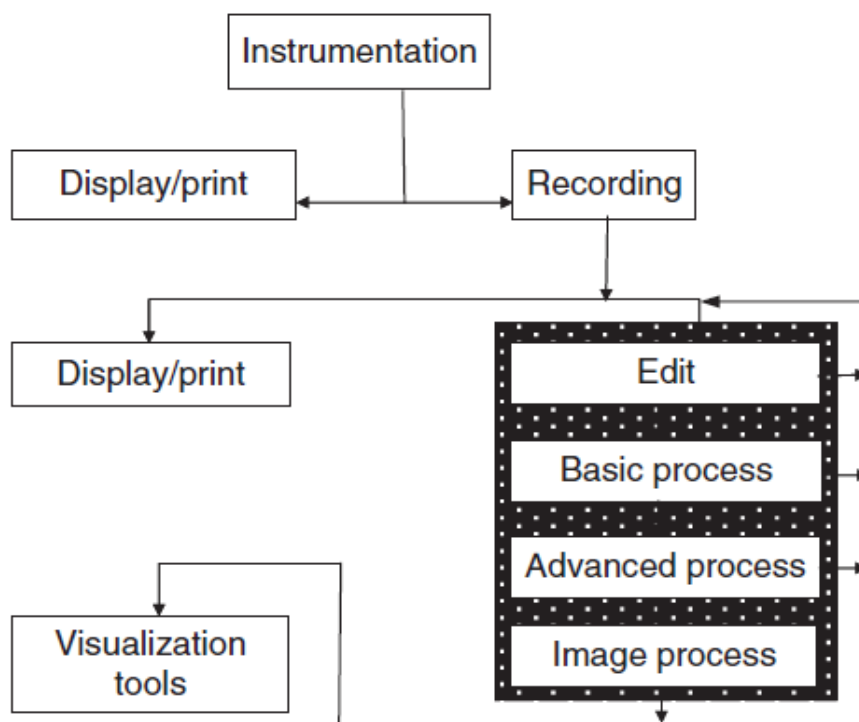


شکل ۳-۸: شمایی از برداشت درون چاهی (<http://www.sigmateh.co.rs>)

۳-۶ پردازش داده‌های GPR

مسیر معمول پردازش داده‌های GPR در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. پردازش^۱ داده‌ها شامل: ویرایش داده‌ها^۲، پردازش اولیه^۳، پردازش پیشرفته^۴، و تصویرسازی^۵/تفسیر می‌باشد. معمولاً پردازش، یک فرآیند تکرار شونده است؛ بطوری که داده‌ها در حلقه پردازش چندین بار جریان می‌یابند (Jol, 2009).

¹ Processing
² Data Editing
³ Basic Processing
⁴ Advanced Processing
⁵ Visualization
⁶ Interpretation



شکل ۳-۹: فرآیند کلی برداشت، پردازش و نمایش داده‌های GPR (Jol, 2009)

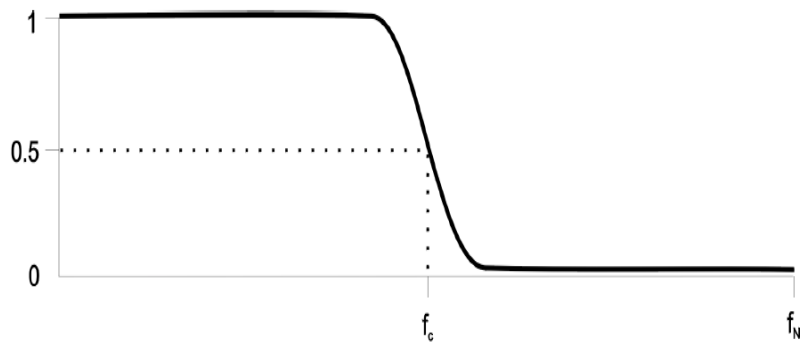
Dewow - ۱-۶-۳

یکی از ویژگی‌های منحصر به فرد داده‌های GPR که به دلیل نزدیک بودن آنتن‌های گیرنده و فرستنده و خصوصیات الکتریکی زمین بوجود می‌آید میدان‌های نزدیک فرستنده شامل انرژی‌های پایین فرکانس (wow)، همراه با میدان‌های الکترواستاتیک و القایی هستند، که به سرعت با افزایش فاصله میرا می‌شوند. این سیگنال‌ها باعث پوشیده شدن انعکاس‌ها با فرکانس‌های بالا می‌شوند (Jol, 2009). مرحله پردازش Dewow برای حذف این امواج فرکانس پایین ناخواسته است. درحالی که سیگنال‌های با فرکانس بالا حفظ می‌شوند. حذف کردن wow، تصحیح اشباع سیگنال^۱ نیز نامیده می‌شود (Sensors & Software, 2001).

^۱ Signal Saturation Correction

۳-۶-۲- فیلتر پایین گذر^۱

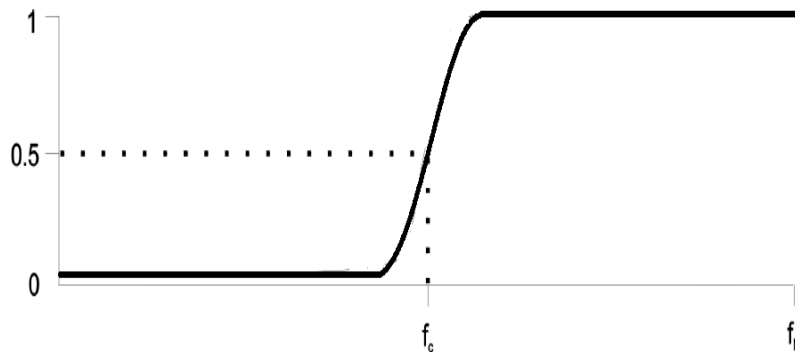
این فیلتر یک فیلتر بازگشتی طراحی شده برای فیلتر کردن ردهای GPR در حوزه زمان است. این فیلتر یک فیلتر نسبتاً سریع برای عبور دادن فرکانس‌هایی پایین‌تر از یک فرکانس معین است (شکل ۱۰-۳) (Sensors & Software, 2001).



شکل ۱۰-۳: شمایی از نحوه عملکرد فیلتر پایین گذر (Sensors & Software, 2001)

۳-۶-۳- فیلتر بالاگذر^۲

همانند فیلتر پایین گذر، این فیلتر نیز یک فیلتر بازگشتی است؛ که در حوزه زمان عمل می‌کند. با این تفاوت که با اعمال این فیلتر سیگنال‌های پایین‌تر از فرکانس معینی حذف می‌شوند (شکل ۱۱-۳) (Sensors & Software, 2001).



شکل ۱۱-۳: شمایی از نحوه عملکرد فیلتر بالاگذر (Sensors & Software, 2001)

¹ Lowpass Filter
² Highpass Filter

۳-۶-۴- فیلتر قائم^۱

فیلتر قائم برای اعمال یک فیلتر میانگین‌گیر رونده در راستای قائم (رو به پایین رد) در طول پروفیل به کار گرفته می‌شود. مقدار داده در یک نقطه مشخص بوسیله میانگین چند داده که در پنجره‌ای به مرکزیت نقطه مورد نظر قرار دارند؛ جایگزین می‌شود. هدف اولیه از اعمال این فیلتر کاهش نوفه‌های تصادفی و یا فرکانس بالا است.

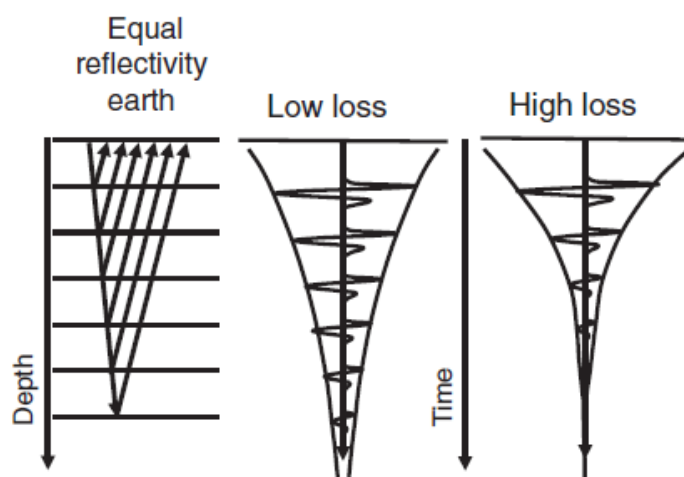
۳-۶-۵- بهره زمانی^۲

امواج GPR با انتشار در زمین به سرعت تضعیف می‌شوند. سیگنال‌های بدست آمده از اعماق بیشتر در مقایسه با سیگنال‌های بازگشتی از اعماق کمتر، بسیار کوچکترند. نمایش هم‌زمان این سیگنال‌ها نیازمند اعمال شرایطی قبل از تصویرسازی است. یکنواخت کردن دامنه‌ها بوسیله اعمال یک تابع بهره وابسته به زمان، افت سریع امواج اعماق پایین‌تر را جبران می‌کند. چنین تقویت متغیر با زمانی به عنوان بهره زمانی و بهره برد^۳ شناخته می‌شود. شکل ۳-۱۲ کاهش دامنه امواج رادار را با گذر زمان نشان می‌دهد. میزان تضعیف در زمین بسیار متغیر است. در یک محیط کم تضعیف می‌توان تا عمق چند ده متر را نیز اکتشاف کرد؛ درحالی که در محیطی که تضعیف امواج زیاد است، حتی ممکن است عمق نفوذ به کمتر از یک متر نیز کاهش یابد.

¹ Vertical Filter

² Time Gain

³ Range Gain



شکل ۳-۱۲: شمایی از مدل زمین لایه‌ای با افق‌های بازتاب‌کننده یکسان ولی با میزان افت‌های متفاوت (Jol, 2009)

بهره‌ها بر چند نوع هستند: بهره AGC، بهره SEC، بهره اتوماتیک

۳-۶-۵-الف- کنترل بهره اتوماتیک^۱ (AGC)

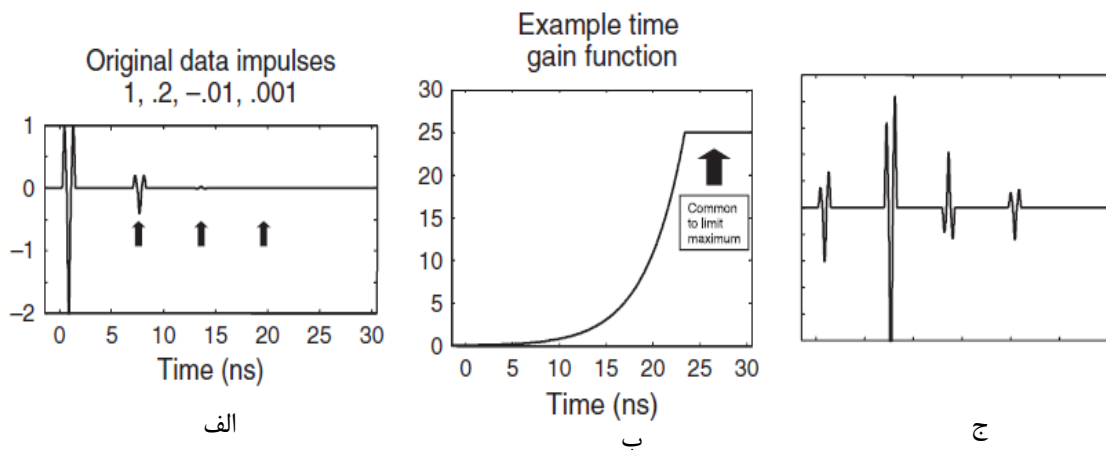
این بهره بیشتر در مشخص کردن پیوستگی بازتابنده‌ها کاربرد دارد. از این‌رو در بیشتر مطالعات رسوب‌شناسی از کنترل بهره اتوماتیک (AGC) استفاده می‌شود. این بهره با اعمال بهره‌ای که با عکس شدت سیگنال متناسب است، دامنه تمامی سیگنال‌های دریافتی را معادل می‌کند. بهره در حدودی که کاربر تعریف می‌کند بر روی داده‌ها اعمال می‌شود.

فصل مشترک‌های متفاوت دارای توان‌های بازتاب متفاوت می‌باشند و هر یک بخشی از سیگنال‌های ورودی را بازتاب می‌کنند. بهره AGC دامنه تمامی سیگنال‌های دریافتی را یکسان می‌کند. در نتیجه اطلاعات حاوی دامنه نسبی سیگنال‌ها از بین خواهد رفت. این اطلاعات در برخی موارد ارزشمند بوده و برای حفظ آنها از بهره‌های دیگری استفاده می‌شود (Sensors & Software, 2001).

¹ Automatic Gain Control

۳-۶-۵-ب- بهره جبران نمایی و گسترش^۱ (SEC)

این بهره ترکیبی از بهره خطی و نمایی است. SEC افت انرژی ناشی از انتشار کروی و اتلاف نمایی حاصل از رسانندگی محیط را جبران می‌کند. از آنجایی که افت داده‌های GPR بصورت نمایی است و بهره SEC نیز نمایی است، لذا سیگنال‌ها بعد از اعمال این بهره به حالت واقعی خود نزدیک‌تر هستند. بنابراین برخلاف بهره AGC اطلاعات دامنه نسبی بازتاب‌ها حفظ می‌شود (شکل ۳-۱۳) (Sensors & Software, 2001).



شکل ۳-۱۳: مفهوم بهره SEC. (الف) یک رد رادار با چهار سیگنال که با افزایش زمان دامنه‌شان کاهش پیدا می‌کند. (ب) تابع نمایی بهره (ج) نتیجه ضرب ب در الف. هر چهار سیگنال در ج قابل مشاهده‌اند (Jol, 2009)

۳-۶-۵-ج- بهره اتوماتیک^۲

بهره اتوماتیک تابعی مناسب را محاسبه و بر روی داده‌ها اعمال می‌کند. این عمل از طریق محاسبه افت میانگین شدت سیگنال با گذر زمان و اعمال معکوس آن بر داده‌ها انجام می‌شود.

¹ Spreading and Exponential Compansation Gain

² Autogain

۳-۶-۶- واپیچش^۱

هدف از اعمال واپیچش معمولاً بیشینه کردن پهنای باند و کاهش پخش‌شدگی پالس برای دستیابی به بیشترین قدرت تفکیک است. اعمال واپیچش عمدتاً سودمند نیست. بخشی از این عدم موفقیت بدلیل این است که پالس‌های GPR کوتاه‌ترین و فشرده‌ترین پالس‌هایی هستند که می‌توان در یک پهنای باند مشخص و نسبت سیگنال به نوفه معین به آن دست یافت. واپیچش در شرایط سودمند است که بازتاب‌های اضافه^۲ یا سیستم بازتاب وجود داشته باشد.

۳-۶-۷- مهاجرت^۳

مهاجرت واپیچش فضایی است، که تأثیر جهت‌گیری منبع و گیرنده را بر روی داده‌های بازتاب شده حذف می‌کند. هدف از بکارگیری مهاجرت بازسازی توزیع صحیح بازتاب کنندگی زیرسطح به صورت هندسی است (Jol, 2009). در اثر اعمال تصحیح مهاجرت سیگنال‌های پخش شده متمرکز می‌شوند. مانند تبدیل یک هذلولی به یک هدف نقطه‌ای (Sensors & Software, 2001).

¹ Deconvolution

² Extraneous Reverberation

³ Migration

۳-۷- مزایای روش GPR

- دستگاه برداشت GPR دستگاهی سبک بوده و قابلیت این را دارد که به راحتی بوسیله نیروی انسانی حمل شود.
- برداشت‌های GPR غیر مخرب بوده، هیچ گونه آسیبی به محیط نمی‌رساند. این قابلیت در کاوش‌های باستانی به دلیل حساس بودن بقایای آثار باستانی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- برداشت‌های GPR با سرعت بسیار بالاتری درمقایسه با سایر روش‌های ژئوفیزیکی صورت می‌گیرد.
- تصاویر حاصل از GPR قدرت تفکیک (وضوح) بالایی دارند.
- بوسیله تصاویر حاصل از GPR می‌توان مکان دقیق اهداف زیرسطحی را تعیین کرد.
- داده‌های GPR قادراند که اهداف فلزی و غیر فلزی را آشکار کنند.
- برداشت داده‌های GPR بدلیل سرعت بالا و نیاز به نفرات کم نسبت به دیگر روش‌های ژئوفیزیکی و حفاری، هزینه بسیار کمتری دارد (Conyers & Goodman, 2004).

۳-۸- محدودیت‌های روش GPR

- موفقیت GPR در دستیابی به عمق اکتشافی بیشتر و تعیین مکان هدف، وابستگی بسیار زیادی به خصوصیات الکتریکی محیط انتشار موج دارد.

- با حضور رس و دیگر مواد رسانا عمق نفوذ امواج بشدت کاهش می یابد.
- برای اینکه بتوان با استفاده از داده های GPR هدف مورد نظر را از مواد دربرگیرنده تمیز داد، باید بین هدف و محیط دربرگیرنده اختلاف خصوصیات الکترومغناطیسی کافی وجود داشته باشد.
- در تفسیر نتایج نهایی تجربه مفسر نقش بسزائی دارد (Conyers & Goodman, 2004).

فصل چهارم

برداشت، پردازش و

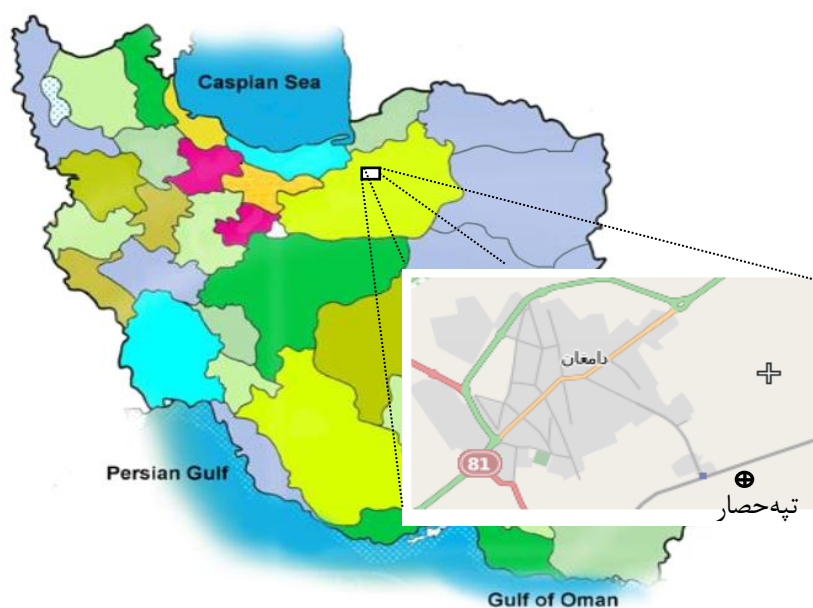
تفسیر داده‌ها

۴-۱- مقدمه

وجود یک دیوار که نسبت به محیط در برگیرنده‌اش (خاک) از تراکم بیشتری برخوردار است، یا وجود یک فضای خالی مانند یک دالان در زیر سطح زمین باعث به وجود آمدن تباين خوبی در خصوصیات فیزیکی یک سازه مدفون با محیط در برگیرنده‌اش می‌شود. از این جهت محوطه‌های باستانی و بطور خاص سازه‌های باستانی مدفون در زیر سطح زمین اهداف مناسب اکتشافی برای روش-های گوناگون ژئوفیزیکی هستند (Conyers & Goodman, 2004; Arisoy et al., 2007). از طرفی با توجه به غیرمخرب بودن، سرعت بالای انجام عملیات‌های ژئوفیزیکی و هزینه کمتر این روش‌ها نسبت به حفاری‌های اکتشافی، به نظر می‌رسد که استفاده از این روش‌ها در کاوش‌های باستانی به خصوص پیش از شروع به کار باستان‌شناسان می‌تواند کمک قابل توجهی به بهینه شدن عملیات اکتشافی کند.

۴-۲- پیشینه تاریخی

تپه حصار دامغان از تپه‌های پیش از تاریخ در فلات مرکزی ایران است که در دو کیلومتری جنوب شرقی شهر دامغان در استان سمنان قرار دارد (شکل ۴-۱). اولین کاوش‌های باستان‌شناسی در این منطقه در سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ توسط یک هیئت آمریکایی از دانشگاه پنسیلوانیا، تحت سرپرستی اریک اشمیدت انجام گرفت و دو تپه در این منطقه حفاری شد (افشارفر، ۱۳۸۵).



شکل ۴-۱: نقشه ایران و مکان محوطه باستانی تپه حصار در شهر دامغان

در نتیجه این کاوش‌ها مشخص شد که تپه حصار دارای سه دوره اصلی فرهنگی از اواخر نوسنگی تا پایان عصر مفرغ است. این محوطه پس از این کاوش به عنوان یکی از محوطه‌های کلیدی برای شناسایی فرهنگ‌های هم‌زمان در فلات مرکزی ایران مورد استناد باستان‌شناسان قرار گرفته است.

بررسی‌های صورت گرفته در مرحله دوم باستان‌شناسی در سال ۱۳۵۵ نشان داد که تپه حصار در هزاره‌های چهارم و سوم پیش از میلاد یکی از مراکز مهم تولیدی برای ساخت انواع اقلام صادراتی نظیر اشیای سنگی و فلزی در فلات ایران بوده است. مرحله سوم کاوش‌ها در سال ۱۳۷۳ با کشف شماری گل‌نبشته به خط میخی بابلی قدیم همراه بود. قدمت این گل‌نبشته‌ها به حدود ۲ هزار سال پیش از میلاد برمی‌گردد که شاهد بسیار خوبی بر وجود مبادلات فرهنگی بین تمدن‌های بین‌النهرین و فلات ایران است.

براساس یافته‌های بدست آمده تاریخ قدیمی‌ترین لایه‌های تپه حصار به اواسط هزاره پنجم قبل از میلاد باز می‌گردد و استقرار در آن تا حدود سال ۱۷۰۰ پیش از میلاد به طور پیوسته ادامه داشته و پس از آن هیچگاه مورد سکونت قرار نگرفت.

همان طور که ذکر شد، حفاری این منطقه ابتدا توسط دکتر اشمیدت در سال‌های ۱۹۳۱ و ۱۹۳۲ میلادی صورت گرفت و آثار ارزنده‌ای متعلق به اولین استقرار دهکده‌ای آشکار شد. در این حفاری سه طبقه اصلی مشخص شد، که هر طبقه شامل چند لایه باستانی است.

قدیمی‌ترین و عمیق‌ترین طبقه تپه حصار، حصار I (تقریباً ۴۲۰۰-۳۵۰۰ ق.م) است؛ که معرف اولین اجتماع مستقر در این تپه می‌باشد و خود دارای ۳ لایه است. آثار معماری که در این طبقه بدست آمده است، عبارت است از خانه‌هایی کوچکی که دیوارهای آنها از چینه و خشت خام ساخته شده‌اند. این خانه‌ها بدون هیچ نقشه اصلی ساخته شده و دارای هیچگونه نظم واحد و خاصی نیست، اتاق‌ها کوچک و فاقد یک نقشه واحد یا شکل خاص هستند که برای استفاده‌های مختلف ساخته شده‌اند.

طبقه دوم حصار، حصار II که از دو لایه فرعی تشکیل شده، چندان قطور نیست و به نظر می‌رسد که مدت استقرار در این دوره چندان طولانی نبوده است. قطر این لایه‌ها در حدود ۱/۵ متر است. دوره حصار II تقریباً، همان محوطه‌ای را که دوران حصار یک فراگرفته است، می‌پوشاند. اتاق‌ها عموماً چهارگوش ساخته شده و یک اتاق مرکزی به عنوان آشپزخانه یا اتاق نشیمن مشاهده می‌شود. اتاق‌های دیگر عموماً بدون هیچگونه نظم و ترتیبی در اطراف این اتاق مرکزی ساخته شده‌اند. دیوارهایی که در دوران حصار I از چینه ساخته شده بودند، دیگر عمومیت نداشته و بیشتر، دیوارهایی دیده می‌شوند که از خشت خام ساخته شده‌اند.

قطر آثار باستانی حصار III با جدیدترین طبقه حدود ۴ متر است، این لایه خود به سه طبقه مربوط به دوره‌های متفاوت تقسیم می‌شود. آثار معماری تپه حصار در طبقه سوم به نحو کاملاً محسوسی توسعه یافته و بقایای ساختمان بزرگی در این طبقه مشاهده می‌گردد (افشارفر، ۱۳۸۵).

۳-۴- برداشت، پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌ها

برداشت‌های ERT و GPR در محوطه باستانی تپه حصار برای بررسی کارایی این روش‌ها در کاوش‌های باستان‌شناسی، مقایسه و ترکیب نتایج دو روش مورد استفاده قرار گرفت. در بخشی از محوطه تپه حصار که به پهنه سفال رنگی معروف است، محدوده‌ای با ابعاد ۲۰×۱۰ متر واقع در بین دو ترانشه انتخاب شد (شکل ۴-۲). عامل اصلی در انتخاب این محدوده همواری آن بود. در نتیجه، عملیات برداشت داده‌ها با سهولت بیشتری انجام شد و همچنین نیازی به تصحیح اثر توپوگرافی در داده‌های اندازه‌گیری شده نبود. علاوه بر این، نتیجه حفاری هر دو ترانشه واقع در دو سمت محدوده، اکتشاف سازه‌های باستانی و به دست آمدن اشیایی از زیر سطح بود. با توجه به شواهد موجود، اینطور استنباط شد که احتمال وجود سازه‌های باستانی در محدوده انتخاب شده نیز می‌تواند بالا باشد.

لازم به ذکر است که، محوطه باستانی تپه حصار در منطقه‌ای کویری واقع شده و تنها مصالح موجود در محیط برای ساختن بناها خاک رس بوده است. از طرفی، باقی‌مانده بناها در آوارهای خود که دارای جنس یکسانی هستند مدفون شده‌اند. با توجه به عوامل فوق، از دیدگاه ژئوفیزیکی نمی‌توان انتظار داشت که تباین قابل توجهی بین ساخت‌های مدفون احتمالی و محیط در برگیرنده‌شان وجود داشته باشد. عاملی که به نظر می‌رسد می‌تواند باعث به وجود آمدن تباین فیزیکی مطلوب بین اهداف زیرسطحی مورد نظر و محیط دربرگیرنده شود، متراکم‌تر بودن ساخت‌های مدفون نسبت به محیط اطراف است. از طرفی این عامل نیز با عبور خط راه‌آهن از میان محوطه باستانی تحت تاثیر لرزش‌های

مداوم ناشی از تردد قطارها قرار گرفته است و با گذشت زمان این بافت سخت تر بناهای احتمالی مدفون نیز سست تر شده. در نتیجه تباین اولیه خصوصیات فیزیکی (مقاومت ویژه و گذردهی نسبی) سازه‌ها با محیط اطرافشان بیش از پیش کاهش پیدا کرده است.



شکل ۴-۲: عکس هوایی از محدوده مورد مطالعه و ترانشه‌های حفر شده (http://earth.google.com)

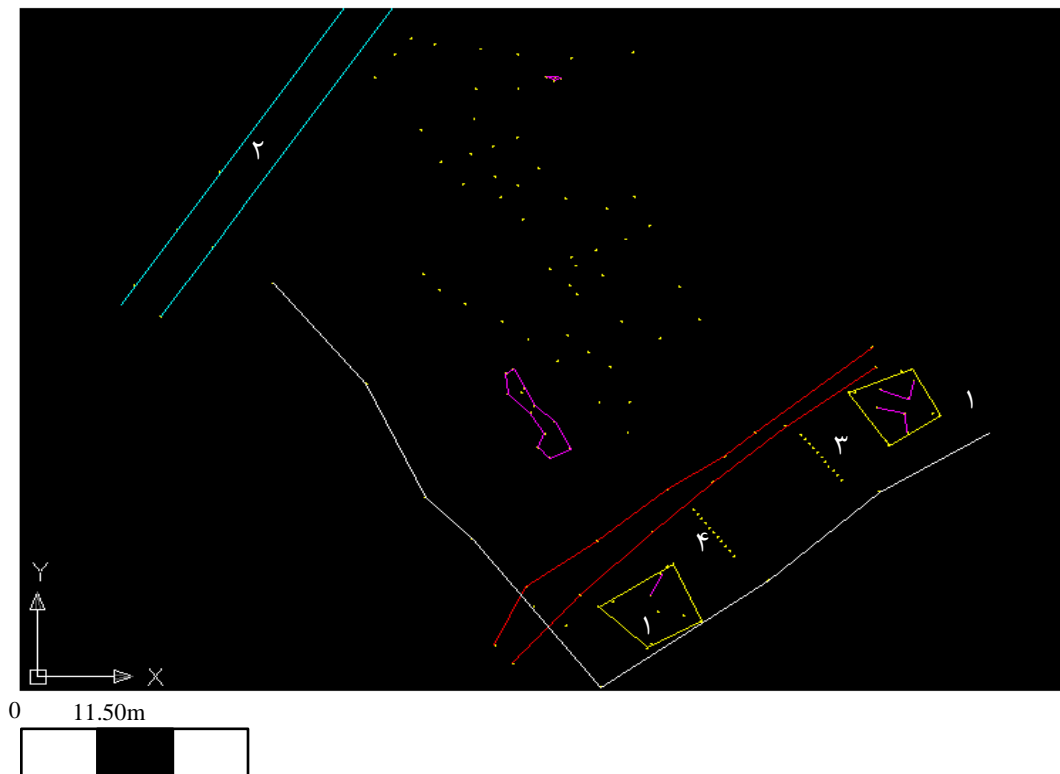
۴-۳-۱- اندازه‌گیری داده‌های ERT

برداشت داده‌های مقاومت ویژه در روش ERT مورد استفاده در این تحقیق در محدوده مورد مطالعه با استفاده از دستگاه مقاومت سنج SAS1000 ساخت شرکت ABEM سوئد انجام شد. نداشتن کابل چند رشته‌ای و واحد تعویض الکترودها که از لوازم اصلی برداشت‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی هستند باعث شد تا برای انجام سریع‌تر برداشت‌ها از تعداد نفرات بیشتر استفاده شود (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳: برداشت داده‌های مقاومت ویژه

شبکه برداشت داده‌های مقاومت ویژه متشکل از ۱۱ پروفیل با طول ۲۰ متر در راستای آزیموت 50° و فاصله جانبی ۱ متر از یکدیگر طراحی و به وسیله متر نواری پیاده شد. بعد از اتمام برداشت‌ها مجدداً کل محوطه بین ترانشه‌ها و خط راه‌آهن با یک دستگاه دوربین نقشه‌برداری نوع Total Station نقشه برداری شد (شکل ۴-۴).



شکل ۴-۴: محوطه نقشه برداری شده. ۱ ترانشه‌ها، ۲ خط راه‌آهن، ۳ ابتدا و ۴ انتهای پروفیل‌های مقاومت ویژه

آرایه دوقطبی-دوقطبی به دلیل حساسیت بالا نسبت به تغییرات جانبی مقاومت ویژه (Loke, 2004) مورد استفاده قرار گرفت. فاصله بین الکترودی ۰/۵ متر انتخاب شد. تعداد گام‌ها (n) برای هر جفت الکتروود حداکثر تا ۸ افزایش پیدا کرد. در مجموع ۱۵۴۰ داده در کل محدوده اندازه‌گیری شد. اگر داده‌ها از پروفیل‌های عرضی (در راستای عمود بر پروفیل‌های برداشت شده) برداشت می‌شدند (۲۱ پروفیل به طول ۱۰ متر)، به جای ۱۰ بار توقف برداشت و جابجایی به پروفیل بعدی، می‌بایست ۲۰ جابجایی صورت می‌گرفت که خود نیازمند صرف زمان بیشتری می‌بود. در ضمن با قرار دادن پروفیل‌ها در طول محدوده برداشت، ۱۵۴۰ نقطه اندازه‌گیری شد در صورتی که در پروفیل‌های عرضی امکان برداشت بیش از ۱۲۶۰ نقطه فراهم نمی‌شد. بدین ترتیب با قرار دادن پروفیل‌ها در طول محوطه برداشت، پوشش شبکه تا ۱۸ درصد بیشتر و زمان لازم برای جابجایی بین پروفیل‌ها تا ۴۸ درصد کاهش پیدا کرد.

۴-۳-۲- مدل سازی و تفسیر داده های ژئوالکتریک

مقادیر اندازه گیری شده در حین برداشت های ژئوالکتریک مقاومت ویژه ظاهری هستند. برای دستیابی به توزیع واقعی مقاومت ویژه در زیر سطح و رسیدن به ضخامت لایه های زیر سطحی از فرآیند مدل سازی استفاده می شود. در تحقیق حاضر برای رسیدن به این مهم پس از اتمام اندازه گیری ها از داده های برداشت شده به عنوان ورودی نرم افزار RES2DINV استفاده شد تا بر روی آنها مدل سازی معکوس انجام شود. در مرحله بعد داده هایی که مقادیر آنها با توجه به دیگر داده ها غیر قابل قبول بودند حذف شدند. سپس به دلیل میزان بالای تغییرات مقاومت ویژه در نزدیکی سطح زمین، ابعاد سلول های مدل در نرم افزار برابر با نصف اندازه فاصله الکترودی واحد انتخاب شد تا میزان دقت در محاسبات افزایش یابد.

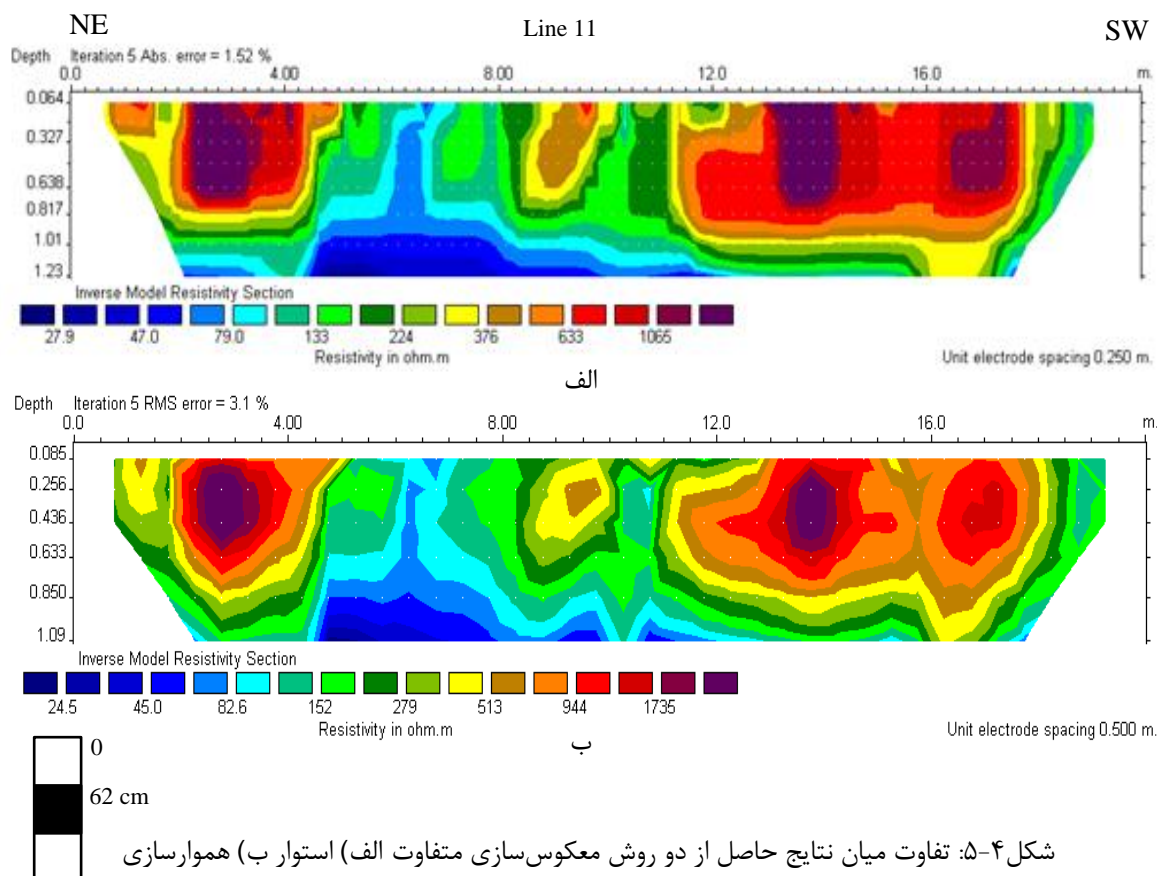
برای معکوس سازی از دو الگوریتم متفاوت هموار سازی^۱ و استوار-مقید^۲ استفاده شد. علاوه بر این، معکوس سازی به دو صورت متفاوت انجام شد. در یک مرحله سعی شد تا با وارد کردن اثر سلول های جانبی تاثیر این بلوک ها بر مقاطع، نسبت به مرحله دیگر که اثر آنها در فرآیند پردازش در نظر گرفته نشده بود مقایسه شود.

در محوطه های باستانی، تغییرات ناگهانی مقاومت ویژه به دلیل وجود تغییرات ناگهانی در مرزها، مانند فضاهای خالی (مثل مقبره ها، دالان های زیرزمینی) و یا زوایای تند موجود در سازه ها معمول است. روش معکوس سازی استوار-مقید حساسیت بیشتری به این گونه تغییرات ناگهانی دارد، به همین دلیل تقریباً در تمامی مقاطع معکوس سازی شده، خطای RMS روش استوار-مقید کمتر از روش هموار سازی بوده و توزیع مقاومت ویژه در زیر سطح نیز بیشتر با واقعیت موجود در محوطه همخوانی دارد. به عنوان مثال، داده های برداشت شده بر روی پروفیل شماره ۱۱ با استفاده از دو روش مذکور

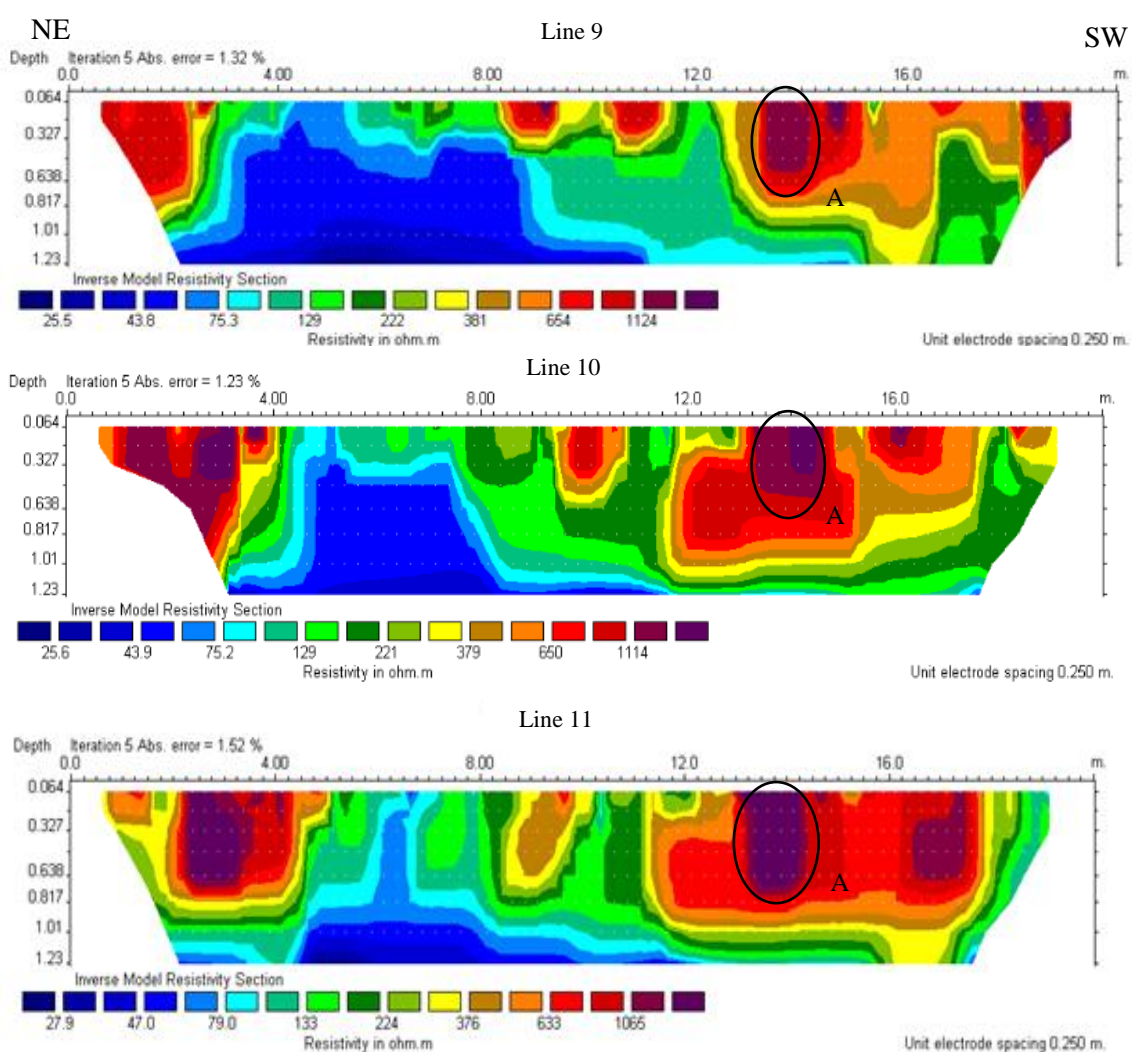
^۱ Smooth inverse modeling

^۲ Robust- Constrain

معکوس‌سازی شدند. در مقطع حاصل از روش معکوس‌سازی استوار-مقید (شکل ۴-۵-الف) میزان خطای RMS ۱/۵۲٪ است. در حالی که در مقطع بدست آمده از روش معکوس‌سازی هموار این خطا به ۳/۱٪ می‌رسد (شکل ۴-۵-ب). همان‌طور که در بالا ذکر شد و در شکل‌های ۴-۵-الف و ب نیز دیده می‌شود آنومالی بدست آمده در مقطع الف از نظم هندسی بیشتری برخوردار است. این آنومالی در مقطع شکل ب با تغییرات تدریجی مقاومت‌ویژه و زوایا گرد دیده می‌شود. تمامی مقاطع آورده شده در ادامه بحث، مقاطع حاصل از معکوس‌سازی روش استوار-مقید است.

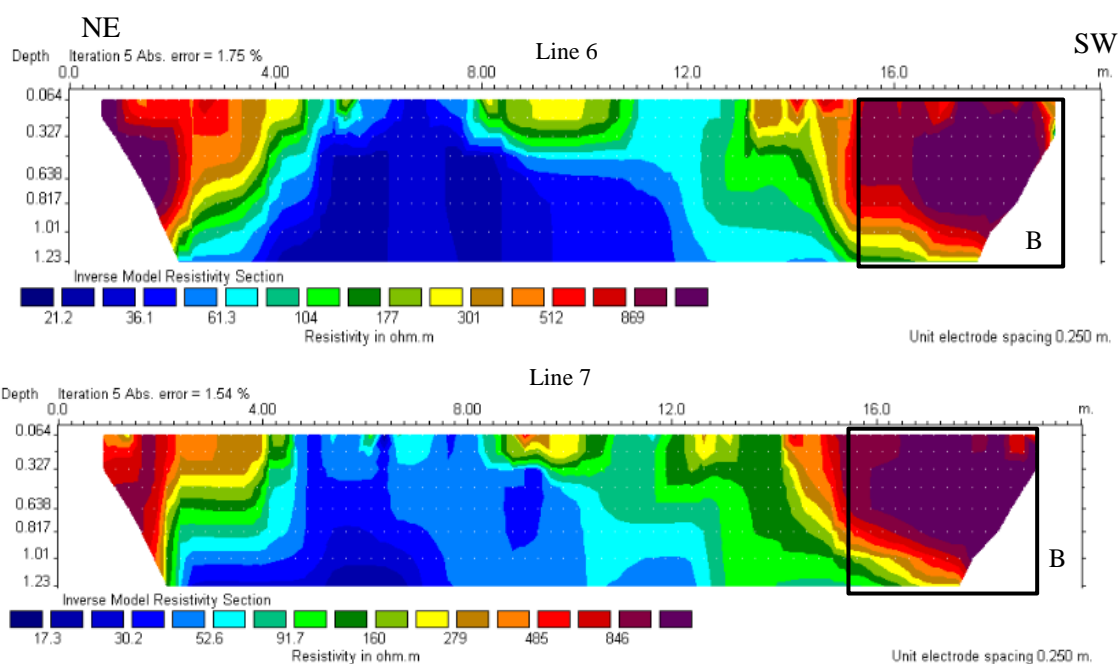


در مقاطع بدست آمده از پروفیل‌های شماره ۹، ۱۰ و ۱۱ (شکل ۴-۶) مشاهده می‌شود که در فاصله بین ۱۳ تا ۱۴/۲۵ متری و در بازه عمقی ۱۰ تا ۵۰ سانتی‌متری آنومالی‌های مشابهی وجود دارد. محتمل است که با توجه به ابعاد و شکل هندسی مشابه، نزدیک بودن مقادیر مقاومت‌ویژه و در امتداد هم بودن آنومالی‌ها هر سه آنها بیان‌گر وجود دیواری در زیر سطح باشند.



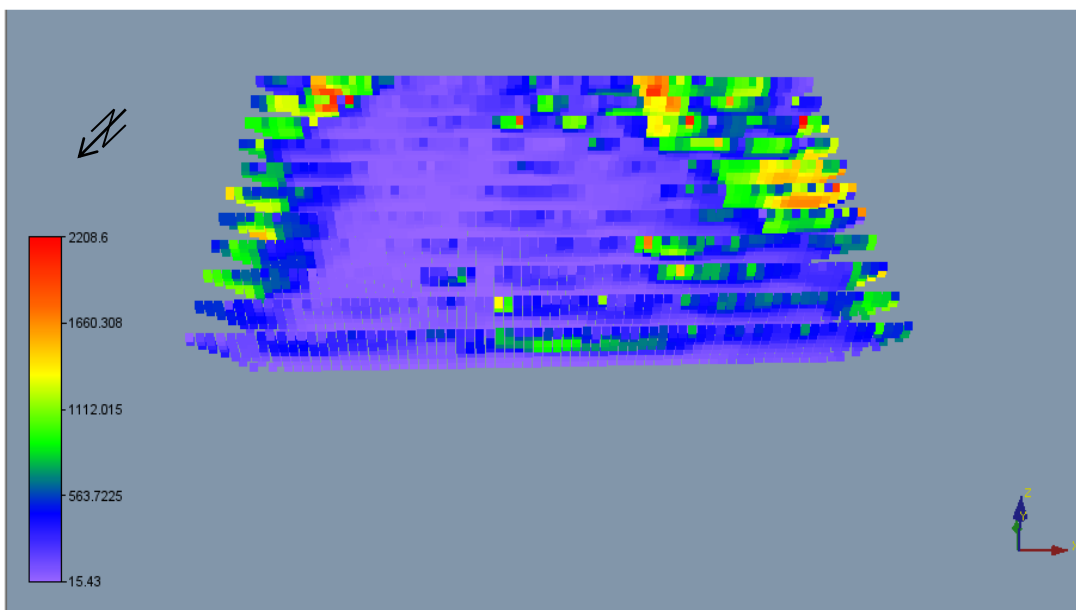
شکل ۴-۶: آنومالی‌های مشخص شده با بیضی (A) موجود در قسمت جنوب غربی محوطه واقع بر پروفیل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ که احتمالاً ناشی از دیواری مدفون هستند

همچنین در پروفیل‌های شماره ۶ و ۷ (شکل ۴-۷) از فاصله ۱۵ متری تا انتهای پروفیل‌ها و در بازه عمقی تقریبی ۱۰ تا ۱۰۰ سانتی‌متری دو آنومالی مشابه دیگر دیده می‌شود. در این قسمت نیز ممکن است دیواری تقریباً در امتداد دو پروفیل مذکور وجود داشته باشد.

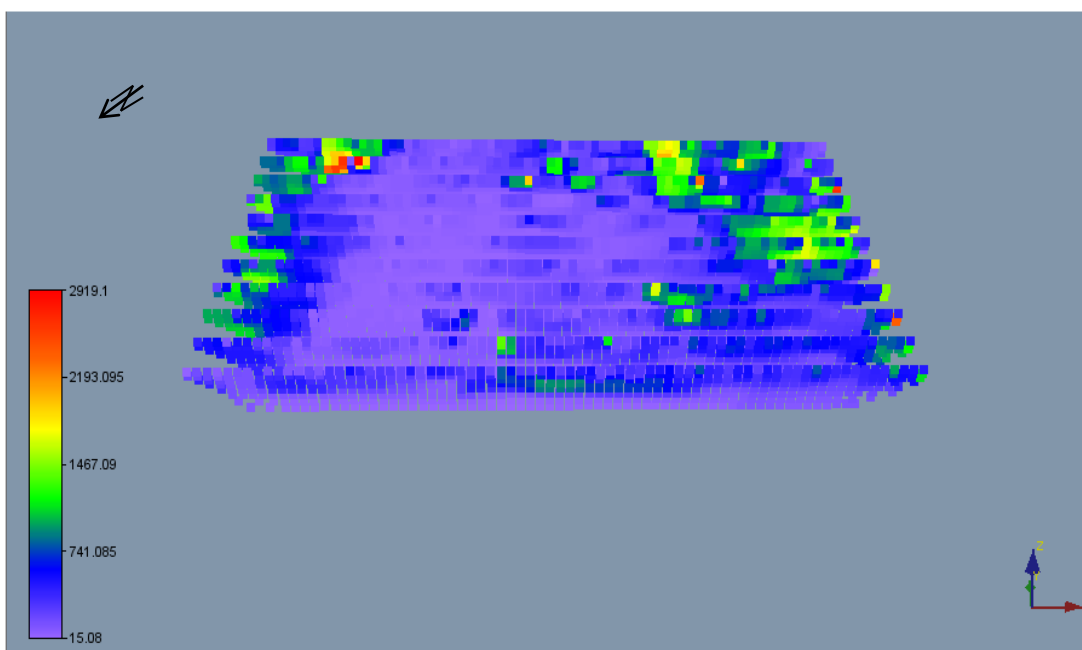


شکل ۴-۷: آنومالی‌های مشخص شده در پروفیل‌های ۶ و ۷ که احتمالاً ناشی از دیواری مدفون در راستای شمال شرق-جنوب غرب هستند

پس از معکوس‌سازی، برای رسیدن به درکی بهتر از تغییرات مقاومت ویژه در زیر سطح از نرم‌افزارهای Voxler Version 1.1.1716 ساخت شرکت Golden Software و SketchUp ساخت شرکت @Last Software برای نمایش سه‌بعدی مقاطع در کنار هم استفاده شد (شکل‌های ۴-۸، ۴-۹، ۴-۱۰ و ۴-۱۱).

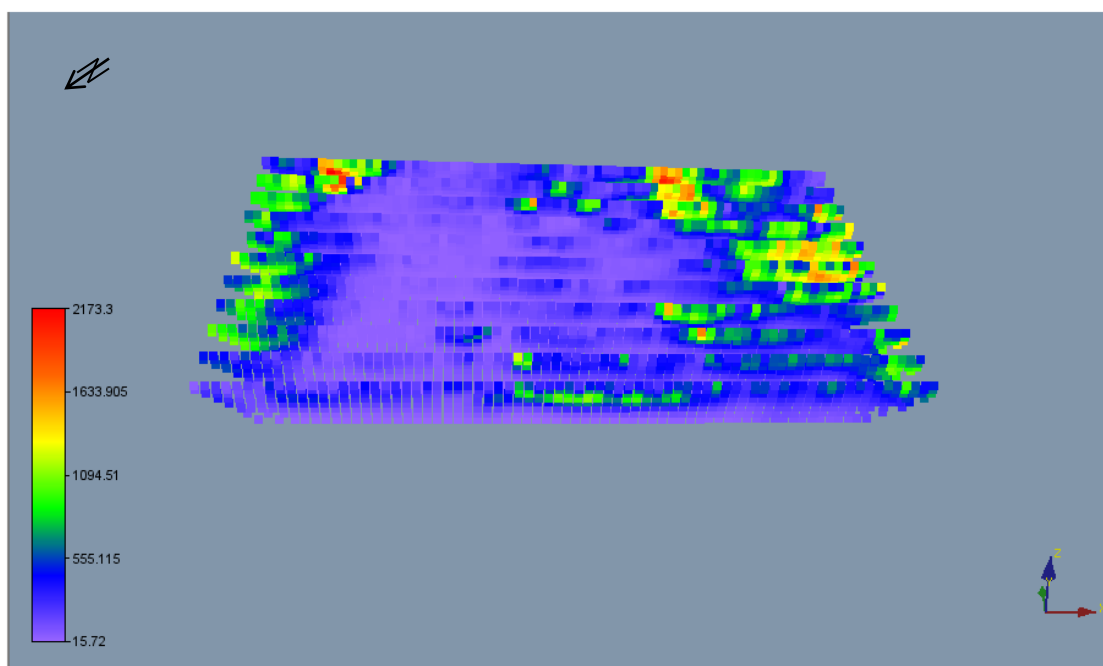


الف

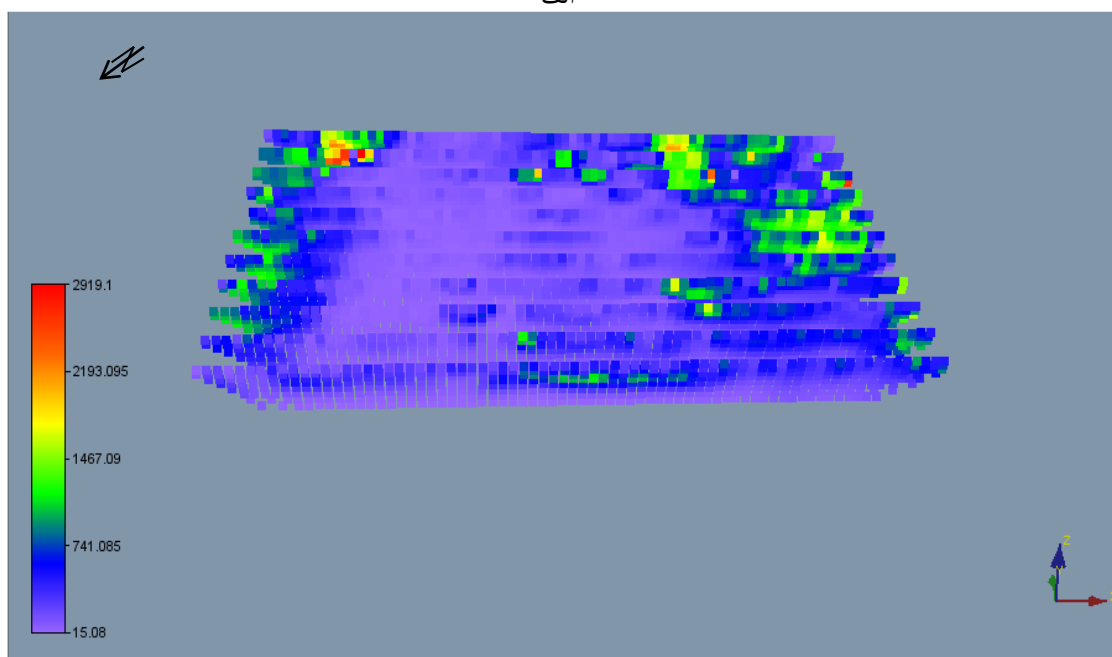


ب

شکل ۴-۸: نمایش سه بعدی نتایج حاصل از معکوس سازی روش استوار الف) اثر بلوک های جانبی وارد شده است ب) اثر بلوک های جانبی لحاظ نشده است



الف

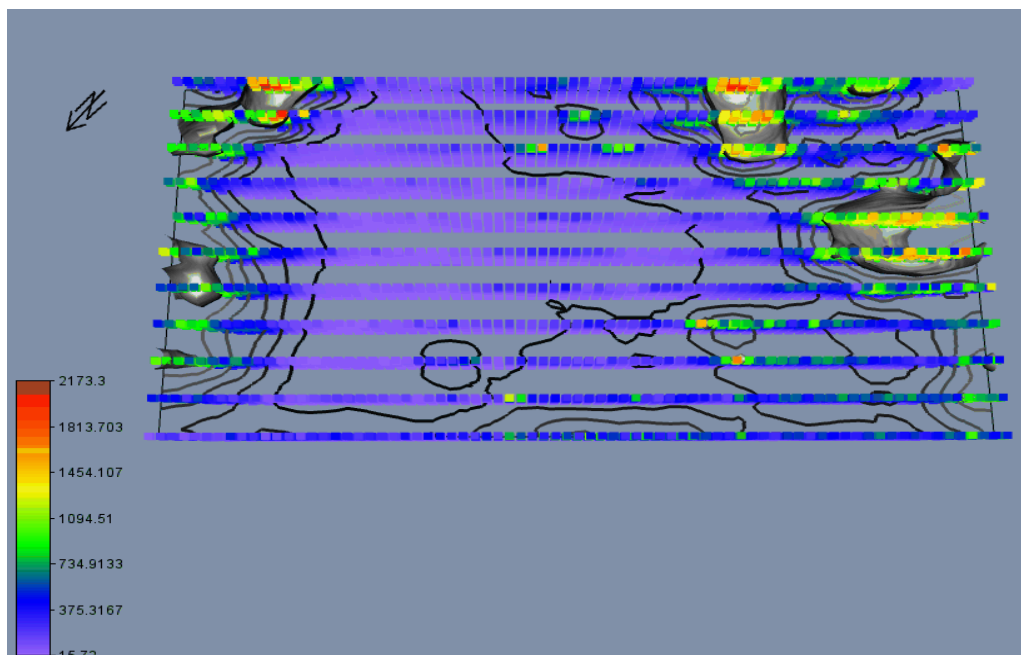


ب

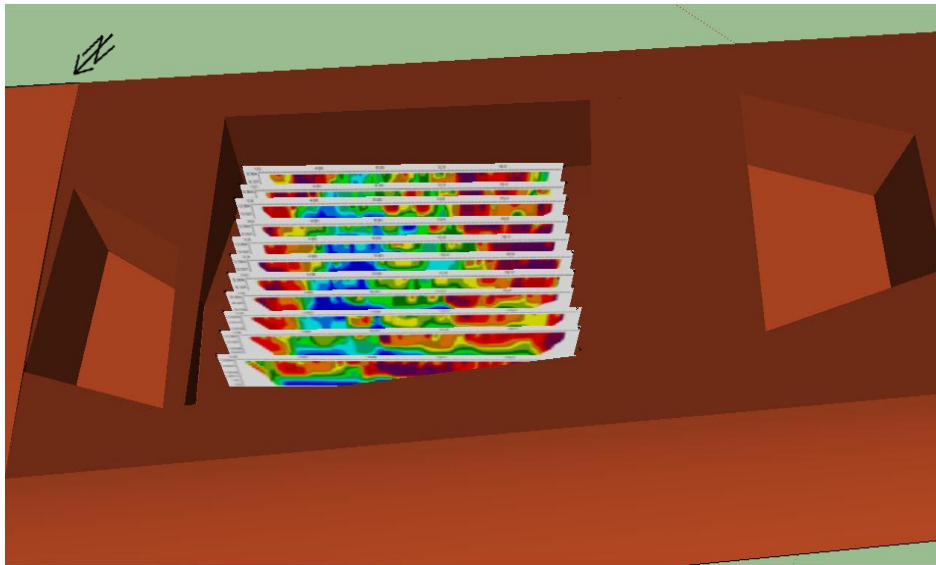
شکل ۴-۹: نمایش سه بعدی نتایج حاصل از معکوس سازی روش هموارسازی الف) اثر بلوک های جانبی وارد شده است ب) اثر بلوک های جانبی لحاظ نشده است

همان طور که پیشتر اشاره شد، داده‌ها به دو روش متفاوت معکوس‌سازی شدند و در حین معکوس‌سازی سعی شد تا با وارد کردن بلوک‌های جانبی در محاسبات و مقایسه نتایج حاصل با نتایج به دست آمده از عدم دخالت آنها در فرآیند معکوس‌سازی اثر آنها بر روی مقاطع بررسی شود.

برخلاف تصور قبلی و نتایج حاصل از مقاطع دو بعدی، در نمایش سه بعدی مشاهده شد که معکوس‌سازی هموار از وضوح کم و بیش بهتری نسبت به روش معکوس‌سازی استوار-مقید برخوردار است. میزان پخش‌شدگی مرزها در روش هموار کمتر است. نتیجه بدست آمده دیگر این بود که با وارد کردن بلوک‌های جانبی به محاسبات، در هر دو روش معکوس‌سازی آنومالی‌ها به مراتب بهتر دیده می‌شوند. همچنین بلوک‌های جانبی در هر دو روش معکوس‌سازی بر مقادیر مقاومت ویژه تاثیر می‌گذارند. زمانی که اثر بلوک‌ها حذف می‌شود بیشینه مقادیر مقاومت ویژه در حدود ۷۰۰ اهم‌متر افزایش می‌یابد (شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ ب).



شکل ۴-۱۰: نمایش سه بعدی داده‌های مقاومت ویژه به همراه خطوط هم مقاومت و سطح هم مقاومت (۸۷۰ اهم متر)



شکل ۴-۱۱: نمایش مقاطع ژئوالکترونیک در کنار یکدیگر و موقعیت آنها نسبت به ترانسه‌ها در نرم‌افزار SketchUp

در تمامی نمایش‌های سه‌بعدی، در بخش جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی محوطه برداشت، آنومالی‌هایی دیده می‌شود. آنومالی‌های واقع در نیمه شرقی محوطه چندان واضح نبوده و احتمالاً بخش عمده این آنومالی‌ها در خارج از محوطه برداشت قرار دارد. اما آنومالی‌هایی که بیشتر جلب توجه می‌کنند و بااهمیت‌تر هستند در بخش غربی تا جنوبی محوطه، در نیمه انتهایی پروفیل‌های شماره ۶ تا ۱۱ هستند. با توجه به شکل نهایی حاصل، محتمل است که این دو آنومالی ناشی از دو دیوار متقاطع باشند که احتمالاً محل تقاطع آنها تحت تاثیر عوامل مختلفی از قبیل فرسایش و فعالیت‌های انسانی تخریب شده است. همان‌طور که در مقاطع پروفیل‌های ۶، ۷، ۹، ۱۰ و ۱۱ (شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷) و همچنین در نمایش سه‌بعدی این پروفیل‌ها که در شکل‌های ۴-۸، ۴-۹، ۴-۱۰ و ۴-۱۱ نشان داده شده است، در بخش میانی محوطه مقادیر مقاومت‌ویژه پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر) است. با توجه به جنس رسی دیوارها و غالب خاک‌های منطقه، این مقادیر احتمالاً مربوط به خاک‌های رس دانه‌ریزی هستند که از تخریب بناهای اطراف و به میزان کمتر، رسوبات نابر جای (شسته شده) حاصل از بارش-های جوی ناشی شده‌اند و به مرور زمان فضای خالی بین بقایای بناها را پر کرده‌اند.

۴-۳-۳- برداشت‌های GPR

برداشت‌های GPR با استفاده از دستگاه رادار Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software انجام گرفت. آنتن مورد استفاده، آنتن پوششی^۱ با فرکانس مرکزی ۲۵۰ MHz بوده است. داده‌ها به روش پروفیل زنی بازتابی جمع‌آوری شدند، در هر متر چهل رد^۲ با طول زمانی ۲۷ ns ثبت شد. پنجره زمانی^۳ داده‌گیری ۳۴ ps و فاصله زمانی بین هر دو نمونه‌گیری^۴ متوالی ۰/۳۹۵ ns بود.

به دلیل سرعت بیشتر GPR در برداشت داده‌ها و احتیاج به تعداد نفرات کمتر برای داده‌گیری و همچنین برای حصول دقت بیشتر در تفسیر، شبکه برداشت با تراکم بیشتری نسبت به شبکه ژئوالکتریک طراحی شد. ۲۱ پروفیل در راستای طولی (آزیموت ۵۰ درجه) با طول ۲۰ متر و به فاصله جانبی ۰/۵ متر از یکدیگر، که تعداد ۱۱ عدد از این پروفیل‌ها منطبق بر پروفیل‌های ژئوالکتریک بودند و تعداد ۴۱ عدد پروفیل در راستای عرضی (عمود بر ۲۱ پروفیل طولی) به طول ۱۰ متر و فاصله جانبی ۰/۵ طراحی شد (شکل ۴-۱۲). پروفیل‌های طولی GPR با شماره فرد منطبق بر پروفیل‌های برداشت شده مقاومت ویژه الکتریکی هستند.

۴-۳-۴- پردازش و تفسیر داده‌های GPR

در حین برداشت، با استفاده از روش برازش هذلولی، سرعت سیر موج در محیط معادل 0.1 m/ns محاسبه شد. داده‌های برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار Win_PXFER به رایانه منتقل شد و سپس

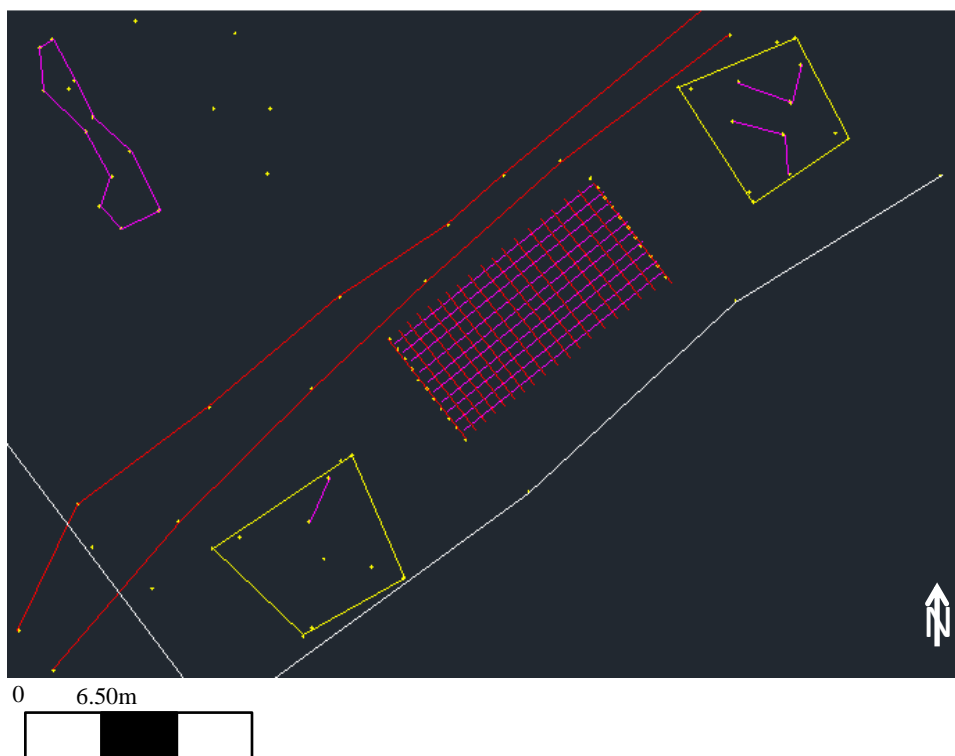
¹ Shielded

² Trace

³ Time Window

⁴ Sampling Interval

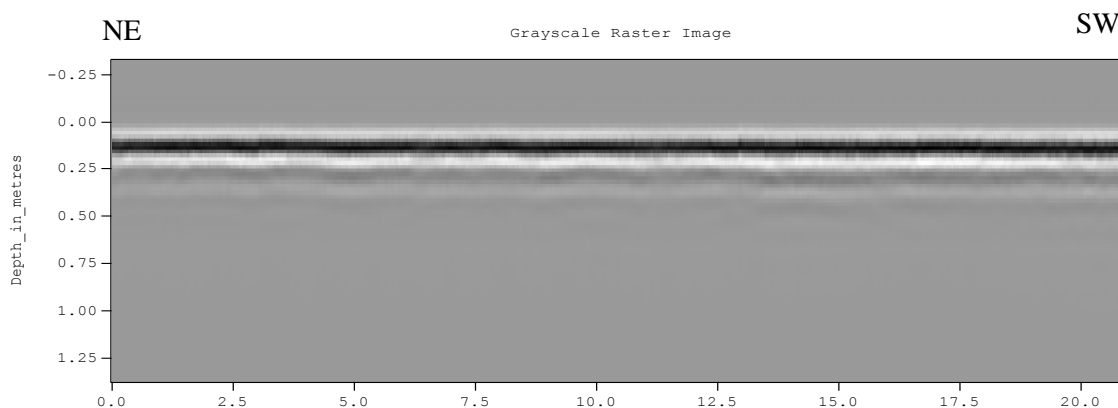
با استفاده از نرم‌افزارهای Win_EKKO_Pro ، EKKO_Mapper و EKKO_3D پردازش و خروجی آنها توسط نرم‌افزارهای Transform و T3D به نمایش در آمد.



شکل ۴-۱۲: شبکه برداشت داده های GPR

به دلیل اینکه محوطه برداشت وسعت کمی (۱۰×۲۰ متر) داشته است، انتظار نمی‌رود که در چنین محدوده‌ای تغییرات چندانی در جنس مواد در برگیرنده رخ داده باشد که باعث تغییر رفتار موج در محیط شود. در نتیجه برای تمامی مقاطع موجود از فیلترها و مراحل پردازش یکسانی استفاده شد. به دلیل نداشتن آگاهی از نحوه رفتار امواج در محیط و نامشخص بودن محدوده فرکانسی سیگنال و نوفه با استفاده از روش آزمون و خطا سعی شد تا با اعمال فیلترهای مختلف و بررسی اثر آنها بر روی مقاطع، مراحل پردازش مناسبی برای داده‌ها انتخاب شود. شکل ۴-۱۳ مقطع پروفیل شماره یک را قبل از اعمال فیلترها نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود در این مقطع فقط حوادث مربوط به

موج مستقیم هوا^۱ و بازتاب موج از فصل مشترک زمین و هوا مشخص است. اطلاعات مربوط به اعماق بیشتر توسط امواج ذکر شده و میدان‌های با فرکانس پایین ناشی از تأثیر فرستنده و گیرنده بر هم پوشیده شده‌اند.



شکل ۴-۱۳: مقطع پروفیل یک بدون اعمال فیلتر

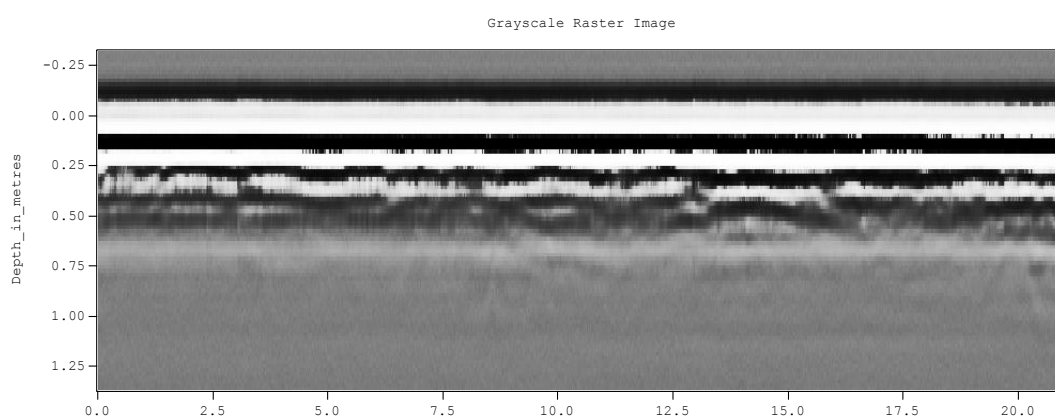
برای حذف اثر امواج با فرکانس پایین و در عین حال حفظ سیگنال‌های مربوط به اعماق بیشتر از فیلتر Dewow استفاده شد. همچنین برای جبران اثر افت دامنه امواج با افزایش عمق بهره‌های زمانی متفاوتی بر روی داده‌ها اعمال شد تا اطلاعات مربوط به اعماق پایین‌تر نیز در مقاطع قابل مشاهده باشد.

اولین بهره اعمال شده بر داده‌ها بهره اتوماتیک بود. شکل ۴-۱۴ مقطع پروفیل یک را پس از اعمال فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود اثر نوفه‌های با فرکانس پایین (wow) با اعمال فیلتر Dewow حذف شده و دامنه تضعیف شده سیگنال‌های بازگشتی از اعماق پایین‌تر نیز با استفاده از بهره اتوماتیک تقویت شده است. در اثر اعمال این فیلترها اطلاعات مربوط به زیر سطح نمایان شده است. حوادثی که در بازه ۲۵- سانتی‌متری تا ۲۵ سانتی‌متری دیده

¹ Direct air wave

می‌شوند مربوط به زیرسطح نیستند بلکه به دلیل فاصله دستگاه از سطح زمین و پدیده جفت شدگی^۱ آنتن‌ها است. تغییرات واقع شده بعد از عمق ۲۵ سانتی‌متری معرف زیرسطح می‌باشند.

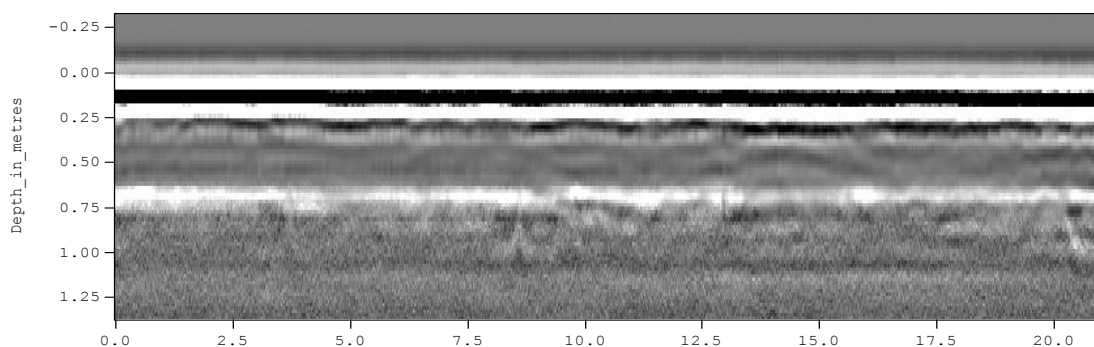
در مقطع دیده می‌شود که از عمق ۷۵ سانتی‌متر به بعد اطلاعاتی بدست نیامده است. رسانایی بالای محیط باعث شده است که امواج به سرعت میرا شده و در نتیجه سیگنالی از عمق ۷۵ سانتی‌متری به بعد دریافت نشود.



شکل ۴-۱۴: مقطع پروفیل شماره یک پس از اعمال فیلترهای Dewow و بهره اتوماتیک

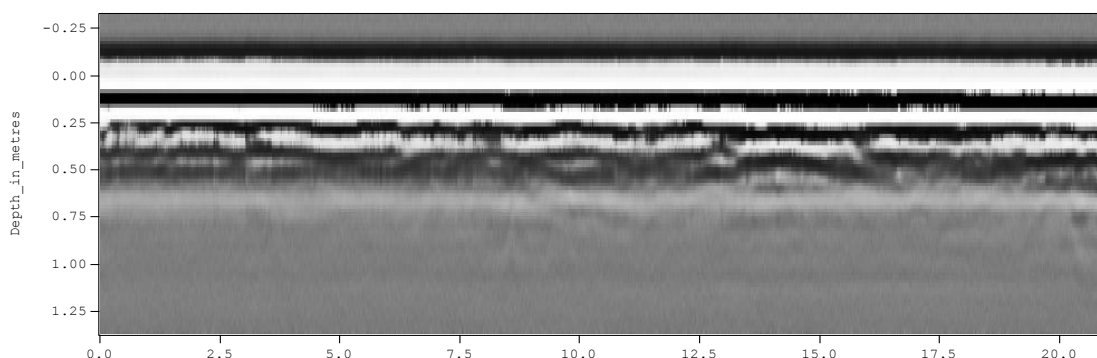
در شکل ۴-۱۵ مقطع پروفیل یک پس از اعمال فیلتر کنترل بهره اتوماتیک (AGC) با عرض پنجره دو و بیشترین بهره اعمالی ۵۰۰ آورده شده است. در اثر اعمال این فیلتر قسمت‌های انتهایی مقطع (تقریباً از عمق ۷۵ سانتی‌متر به پایین) که نویزی و فاقد سیگنال بوده است تقویت شده. در حالی که این فیلتر در بازه عمقی ۲۵ تا ۷۰ سانتی‌متری که عمده سیگنال‌ها در این بازه قرار دارند به خوبی عمل نکرده است.

¹ Coupling



شکل ۴-۱۵: مقطع پروفیل یک پس از اعمال بهره AGC با عرض پنجره ۲ و بیشترین بهره اعمالی ۵۰۰

در زیر (شکل ۴-۱۶) نتیجه اعمال بهره جبران نمایی و انتشار (SEC) با ضریب افت ۱۰ و بیشینه بهره اعمالی ۵۰۰ به همراه فیلتر قائم با عرض سه نقطه دیده می‌شود. بطور کلی می‌توان گفت که مقطع بدست آمده از ترکیب این دو فیلتر وضوح و کیفیت چندانی نسبت به مقطع حاصل از اعمال فیلترهای Dewow و بهره اتوماتیک (شکل ۴-۱۴) ندارد.

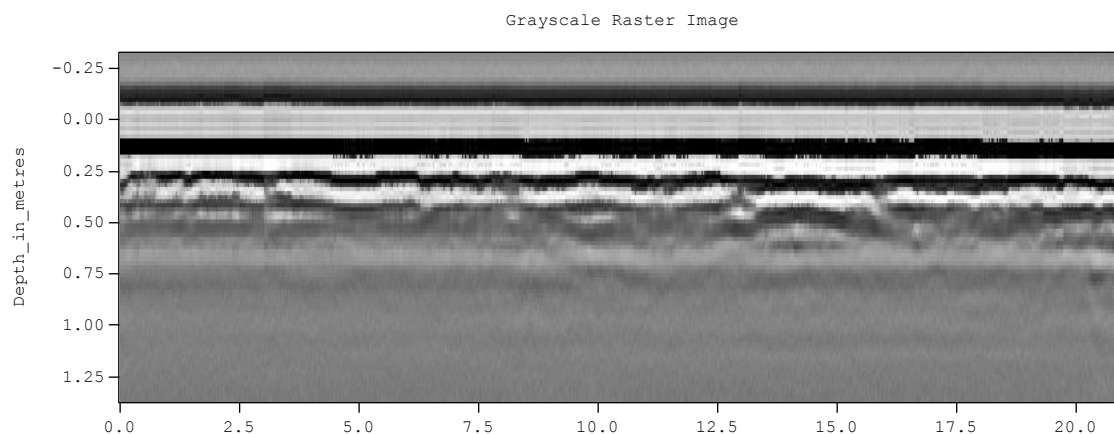


شکل ۴-۱۶: مقطع پروفیل شماره یک پس از اعمال بهره SEC با ضریب تضعیف ۱۰ و بیشترین بهره ۵۰۰ و فیلتر قائم با عرض پنجره ۳ نقطه

به دلیل ناشناخته بودن محدوده فرکانسی نوفه‌های موجود در محیط، از فیلترهای بالاگذر با فرکانس قطع ۱۲۶/۳ مگاهرتز (۱۰٪ فرکانس نایکویست^۱) و پایین‌گذر با فرکانس قطع ۱۱۳۶/۹ مگاهرتز (۹۰٪ فرکانس نایکویست) بصورت آزمایشی استفاده شد. این فیلترها به همراه فیلتر Dewow و بهره

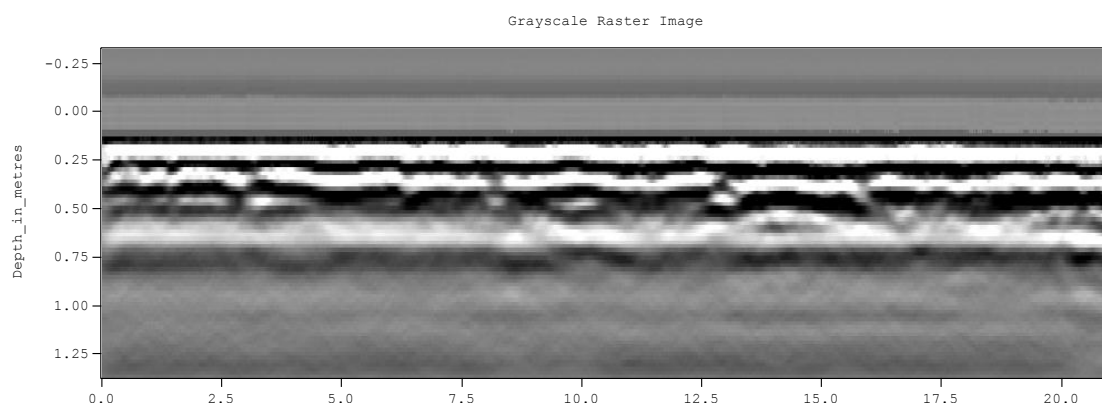
¹ Nyquist frequency

اتوماتیک بر روی داده‌های پروفیل یک اعمال شدند (شکل ۴-۱۷). در نتیجه اعمال ترکیب این فیلترها بخشی از سیگنال‌ها که در محدوده فرکانسی فیلترها بوده حذف شدند و وضوح تصویر نسبت به مقطع حاصل از اعمال فیلترهای Dewow و بهره اتوماتیک (شکل ۴-۱۴) کاهش یافته است.



شکل ۴-۱۷: مقطع پروفیل شماره یک پس از اعمال فیلترهای Dewow، بهره اتوماتیک، و فیلتر پایین-گذر و بالاگذر

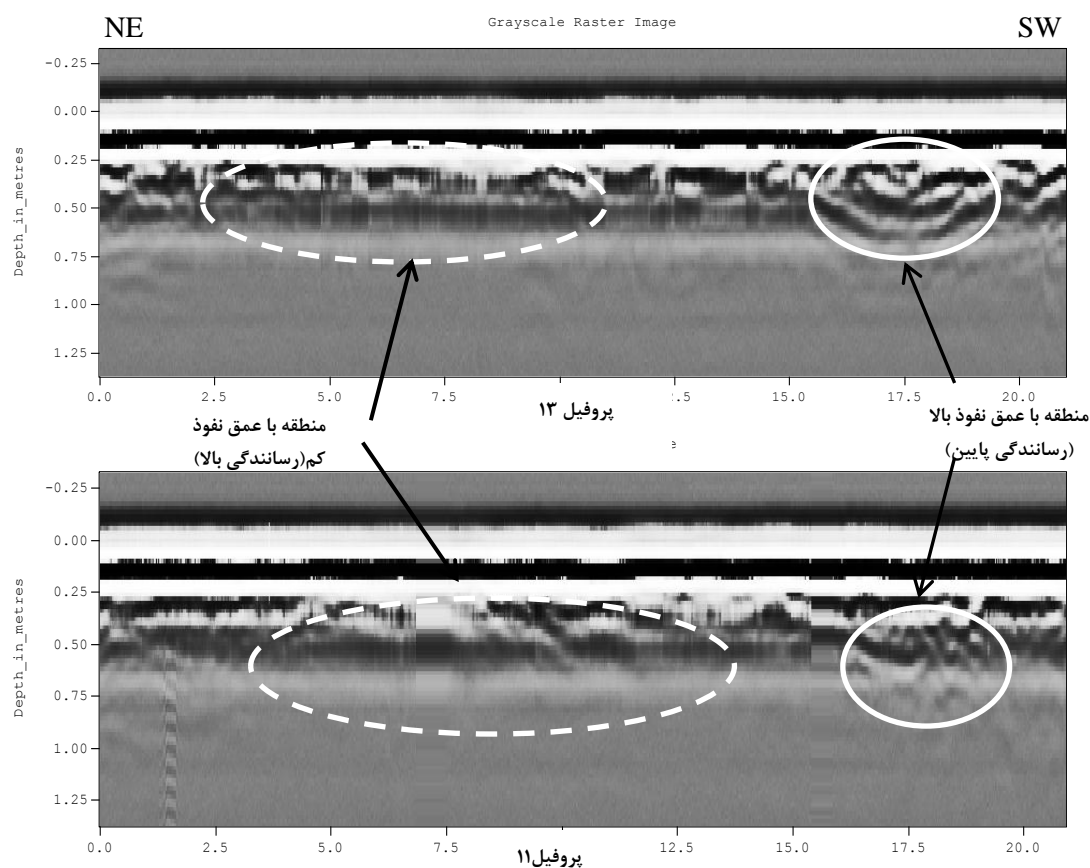
از دیگر فیلترهای اعمال شده بر داده‌ها تصحیح مهاجرت بود. هذلولی‌های موجود در یک مقطع پاسخ مشخصه اهداف نقطه‌ای (مثل لوله قرار گرفته در راستای عمود بر پروفیل) هستند که در اثر پراکنده شدن انرژی امواج در برخورد به آنها بوجود می‌آیند. تصحیح مهاجرت برای متمرکز کردن دوباره این انرژی‌های پراکنده شده به کار می‌رود. از آنجایی که در محوطه برداشت چنین اهدافی مورد انتظار نبود و چنین اثری در مقاطع نیز دیده نشد، در نتیجه اعمال تصحیح مهاجرت بر روی داده‌ها اثری بر مقاطع نداشت (شکل ۴-۱۸).



شکل ۴-۱۸: مقطع پروفیل شماره یک پس از اعمال فیلترهای Dewow، بهره اتوماتیک، فیلتر بالاگذر، فیلتر پایین‌گذر و تصحیح مهاجرت

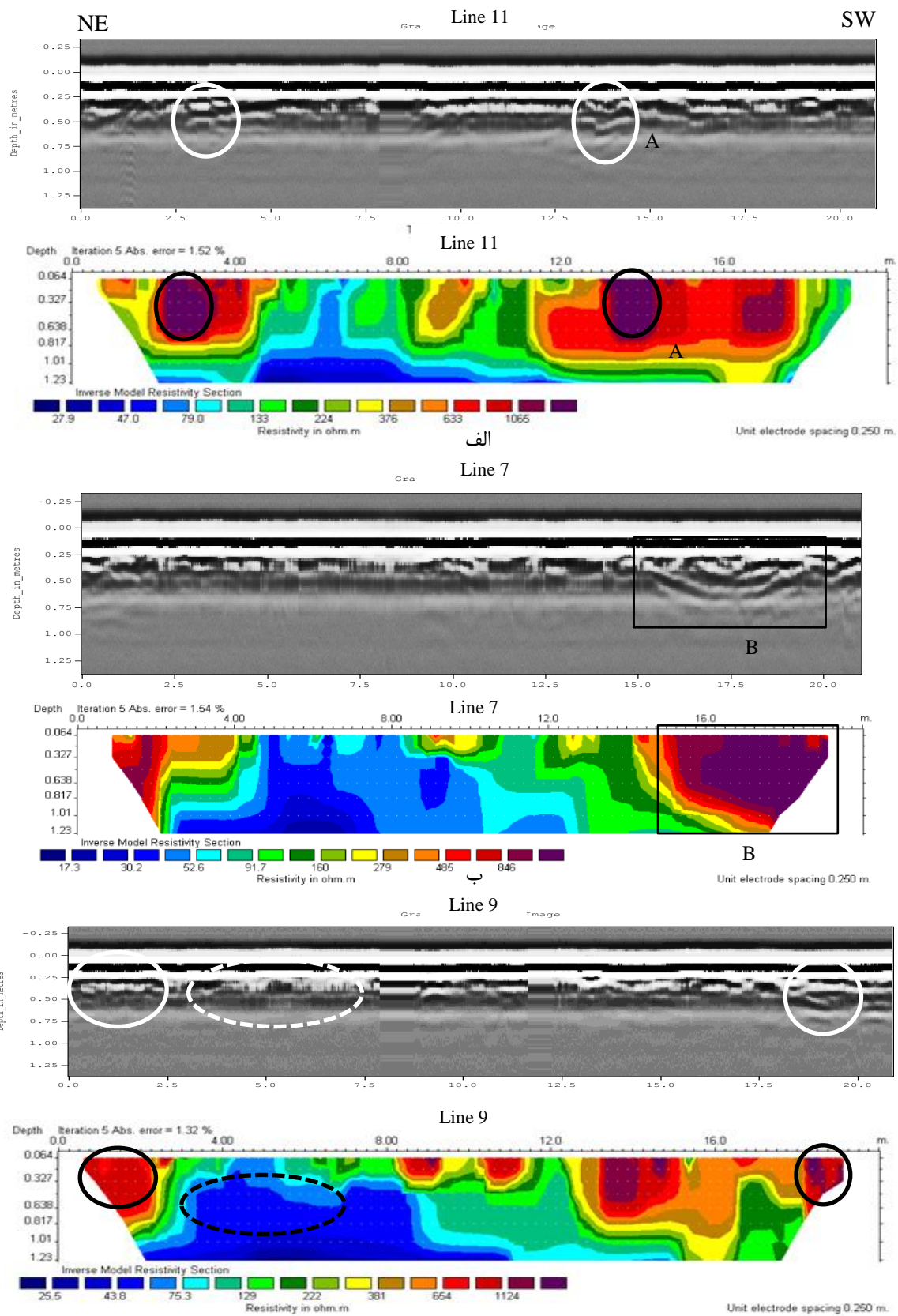
پس از به کار بردن تمامی فیلترهای مذکور مشخص شد که از اعمال توآمان فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک واضح‌ترین نتایج نسبت به دیگر فیلترهای مورد استفاده بدست آمده است. به همین دلیل برای ادامه کار از ترکیب این دو فیلتر استفاده شد.

پس از اتمام مرحله پردازش، مقاطع برای تفسیر مورد بررسی قرار گرفتند. همان طور که در مقاطع GPR نشان داده شده در شکل ۴-۱۹ نمایان است در قسمت میانی پروفیل‌های شماره ۱۱ و ۱۳ (منطبق بر پروفیل‌های شماره ۶ و ۷ ژئوالکتریک) (مشخص شده با بیضی خط‌چین) عمق نفوذ نسبت به بخش انتهایی آنها (مشخص شده با بیضی خط‌پر) به شدت کاهش پیدا کرده است. این پدیده در نقشه‌های برش عمقی (شکل ۴-۲۱) نیز به صورت بازتاب‌های با دامنه کمتر در قسمت میانی محوطه و بازتاب‌های با شدت بیشتر در بخش غربی تا جنوبی دیده می‌شود. علت این رخداد در قسمت‌های میانی احتمالاً افزایش رسانندگی در اثر وجود بافت سست‌تر و رسوبات دانه ریزی است که در اثر تخریب سازه‌ها و یا روی هم انباشته شدن رسوبات ناشی از جریانات حاصل از ریزش‌های جوی است. در نیمه غربی محوطه که عمق نفوذ بیشتر است، احتمالاً بافت متراکم‌تر (با مقاومت ویژه بالاتر نسبت به بخش میانی) وجود دارد که در این صورت این بافت متراکم می‌تواند مربوط به سازه‌های مدفون زیرسطح باشد.



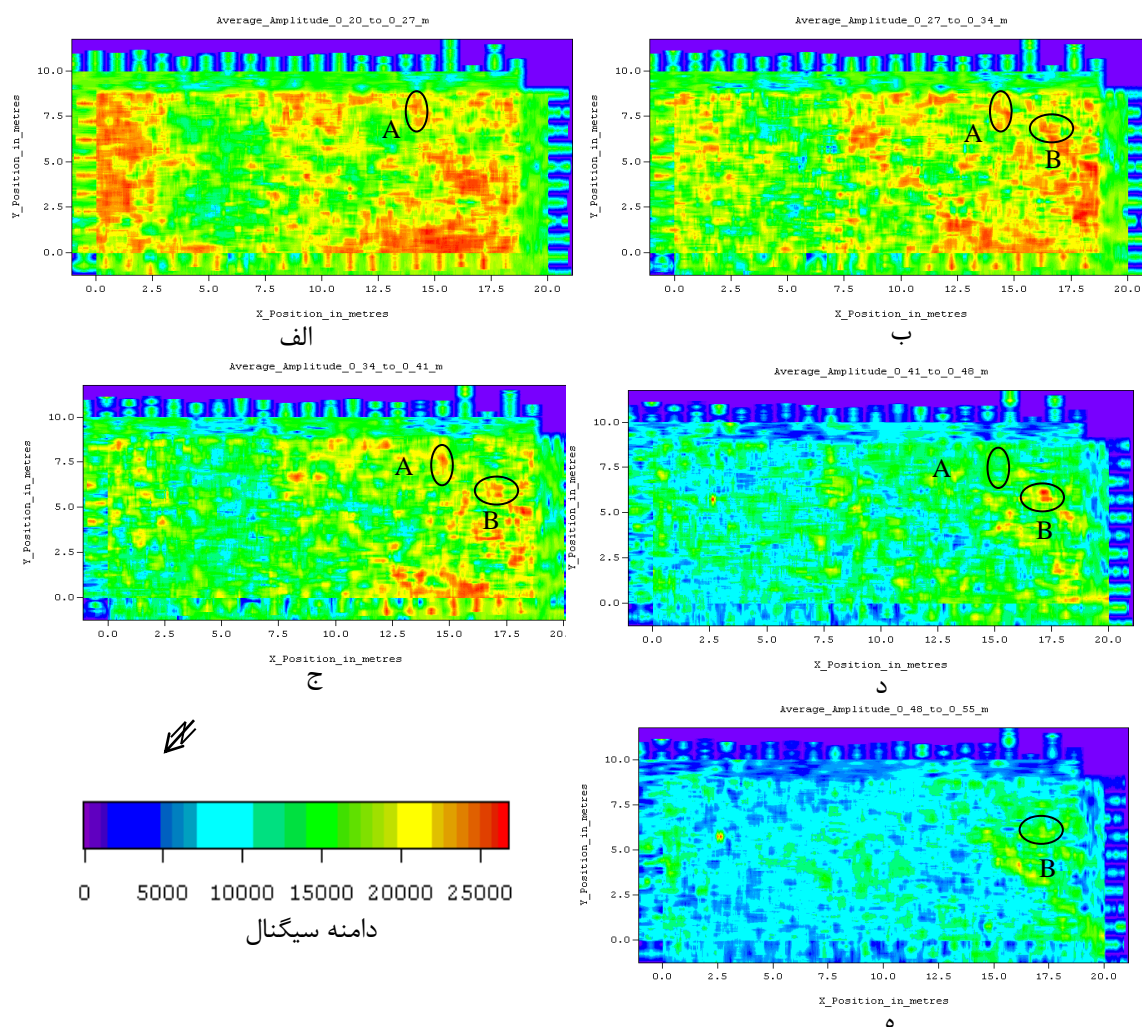
شکل ۴-۱۹: ناحیه با مقاومت ویژه بالا که عمق نفوذ امواج در آن زیاد است با بیضی خط‌پر مشخص شده و ناحیه با رسانندگی بالا (مقاومت ویژه پایین) که عمق نفوذ امواج در آن کم است با بیضی خط‌چین مشخص شده است.

در شکل ۴-۲۰ تعدادی از پروفیل‌های GPR به همراه پروفیل‌های مقاومت ویژه آنها دیده می‌شود. قسمت‌های مشخص شده در مقاطع آنومالی‌هایی هستند که توسط هر دو روش شناسایی شده‌اند. بیضی‌های خط‌پر مشخص کننده نواحی با مقاومت ویژه بالا و بیضی خط‌چین نمایانگر محدوده‌ای با رسانندگی بالاست. A و B (رجوع شود به شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷) نیز آنومالی‌های ناشی از دیوارهای مدفون احتمالی هستند همان طور که مشاهده می‌شود تطابق خوبی میان نتایج حاصل از دو روش وجود دارد. عمق قرارگیری این آنومالی‌ها (A و B) چه در مقاطع GPR و چه در مقاطع مقاومت ویژه کمتر از ۱۰ سانتی‌متر است.



شکل ۴-۲۰) مقاطع حاصل از روش GPR در مقایسه با مقاطع ژئوالکتریک متناظر. A و B احتمالاً دیوارهای مدفون باشند (رجوع شود به شکل ۴-۶ و ۴-۷).

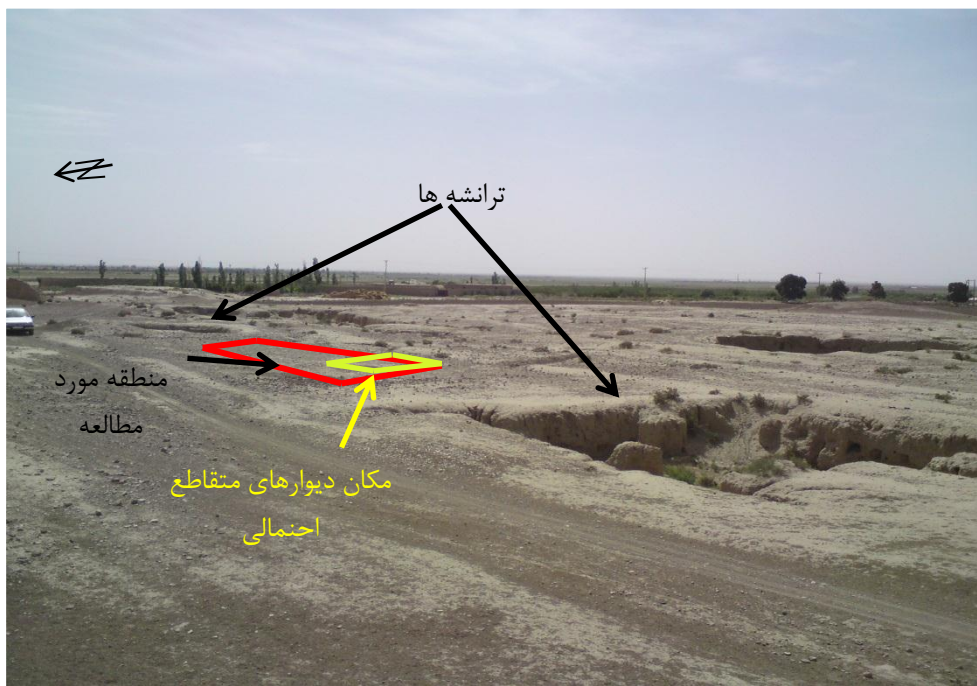
پس از پردازش تمامی داده‌های GPR برای رسیدن به دیدی واضح‌تر از زیر سطح با استفاده از نرم‌افزار EKKO_Mapper از داده‌های پردازش شده برش‌های عمقی^۱ تهیه شد (شکل ۴-۲۱). بدین طریق می‌توان بیشترین اطلاعات را از داده‌های GPR به دست آورد (Conyers & Goodman, 2004). اعماق به دست آمده براساس سرعت محاسبه شده از روش برازش هذلولی است و دامنه سیگنال‌ها با رنگ‌های مختلف در شکل مشخص هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شکل ۴-۲۱ نیز آنومالی‌های A و B مشخص شده در مقاطع GPR و ژئوالکترونیک دیده می‌شود.



شکل ۴-۲۱: برش‌های عمقی داده‌های GPR الف: عمق ۲۰ تا ۲۷ سانتی‌متر ب: عمق ۲۷ تا ۳۴ سانتی‌متر ج: عمق ۳۴ تا ۴۱ سانتی‌متر د: عمق ۴۱ تا ۴۸ سانتی‌متر ه: عمق ۴۸ تا ۵۵ سانتی‌متر

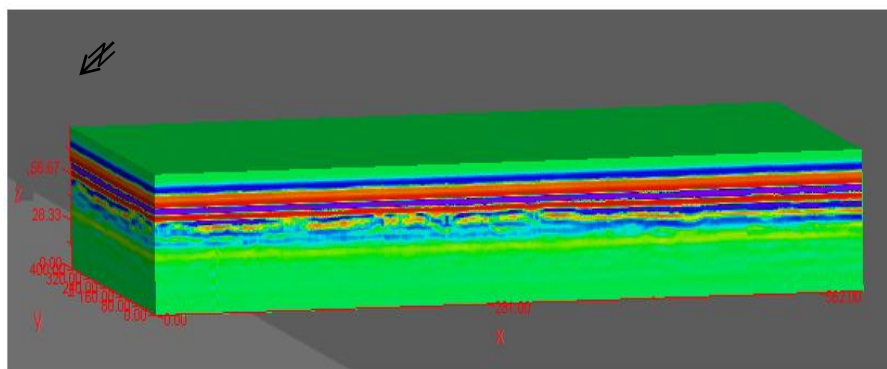
¹ Slice Map

در شکل ۲۲-۴ موقعیت محوطه برداشت نسبت به ترانشه‌های حفر شده و مکان دیوارهای احتمالی به نمایش در آمده است.

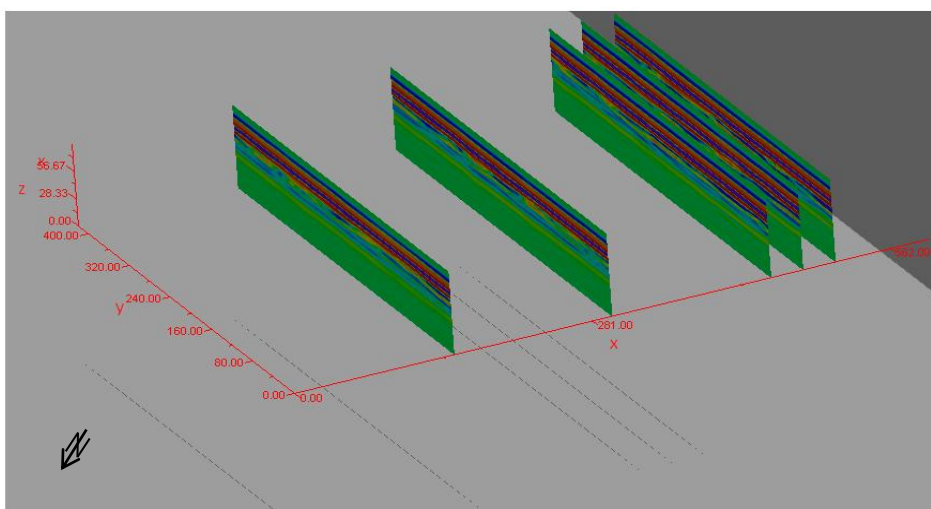


شکل ۲۲-۴: محوطه برداشت (مستطیل قرمز)، مکان دیوارهای احتمالی مدفون در زیر سطح (مستطیل زرد)

در ادامه فرآیند تفسیر، برای درک بهتر ابعاد، شکل هندسی و موقعیت فضایی آنومالی‌ها در زیر سطح داده‌ها وارد نرم‌افزار EKKO_3D شدند تا فایلی با فرمت نرم‌افزار T3D برای نمایش سه بعدی تهیه شود (شکل‌های ۲۳-۴ و ۲۴-۴).

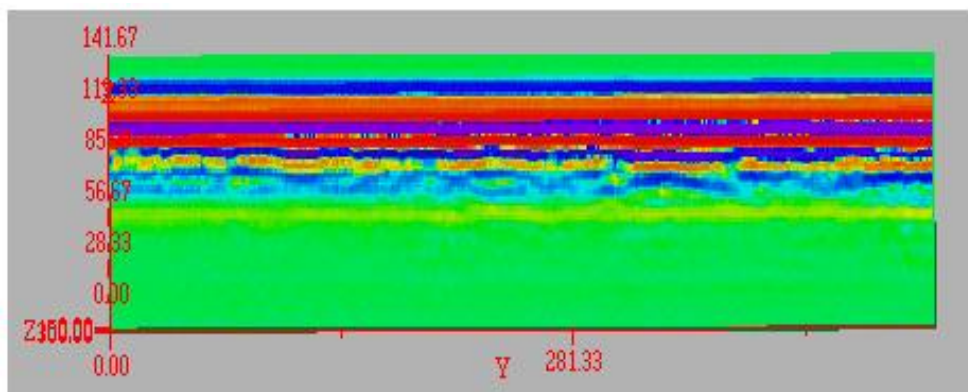
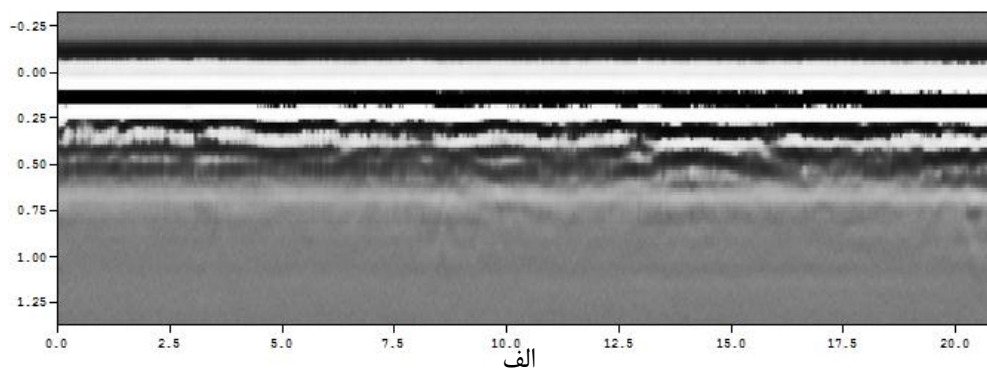


شکل ۲۳-۴: نمایش سه بعدی داده‌های GPR در نرم‌افزار T3D



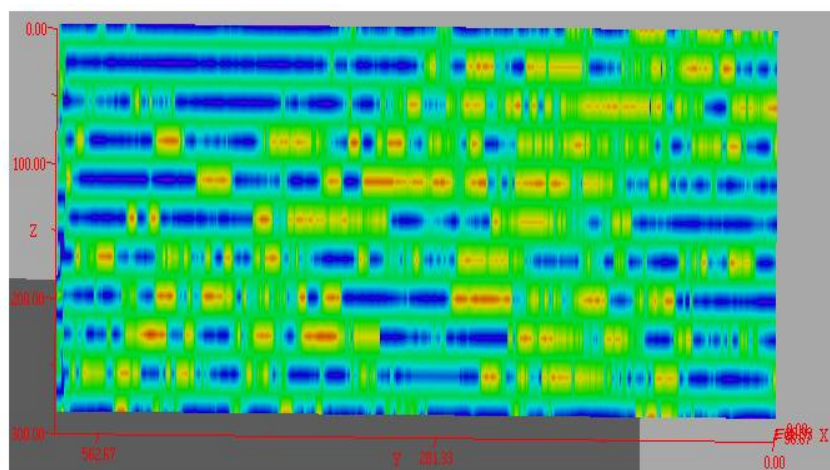
شکل ۴-۲۴: نمایش پنج مقطع از داده‌های برداشت شده در نرم افزار T3D

مقاطعی که در نرم‌افزار EKKO_3D تولید و در نرم‌افزار T3D به نمایش درآمد همانند مقاطع خروجی از نرم‌افزار Win_EKKO_Pro واضح نبودند (شکل ۴-۲۵).

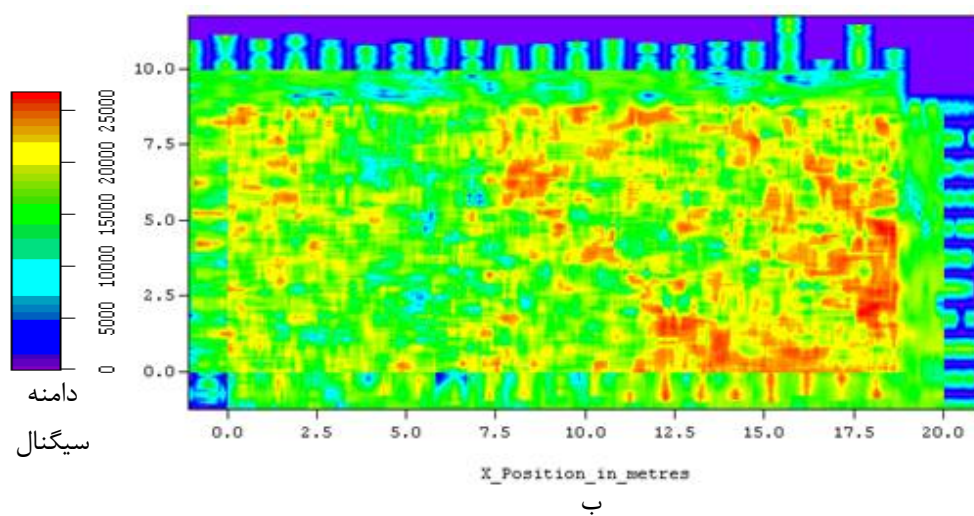


شکل ۴-۲۵: مقایسه مقاطع بدست آمده از دو نرم افزار (الف Win_EKKO_Pro ب) EKKO_3D

همچنین برش‌های عمقی بدست آمده از این طریق نیز به کیفیت برش‌های عمقی حاصل از نرم‌افزار EKKO_Mapper نبودند (شکل ۴-۲۶). دامنه سیگنال با رنگ‌های مختلف در این شکل نشان داده شده است.



الف



ب

شکل ۴-۲۶: مقایسه برش عمقی بدست آمده از دو نرم افزار الف) EKKO_3D ب) EKKO_Mapper

به دلایل ذکر شده در بالا دو نرم‌افزار EKKO_3D و T3D دیگر مورد استفاده قرار نگرفتند.

۴-۴- مقایسه نتایج حاصل از دو روش ERT و GPR

نتایج برداشت‌های ERT و GPR در این فصل حاکی از آن است که

پردازش و تفسیر داده‌های GPR دشوارتر از داده‌های مقاومت‌ویژه الکتریکی بوده است. همچنین، تفسیر داده‌های GPR بدون در نظر گرفتن نتایج حاصل از روش ERT به آسانی صورت نمی‌گرفت. تجربه مفسر در تفسیر نتایج حاصل از GPR نقش بسیار مهمی دارد.

تأثیرپذیری داده‌های GPR از عوامل محیطی بیشتر از داده‌های ERT است. به عنوان مثال به دلیل رسانندگی بالای محیط عمق نفوذ امواج GPR بشدت پایین است. در حالی که عملیات برداشت داده‌های GPR راحت‌تر، با سرعت بیشتر و نیاز به تعداد نفرات کمتر انجام می‌شود.

فصل پنج

نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۵-۱- نتیجه‌گیری

- ✓ اولین نتیجه بدست آمده از تفسیر داده‌ها وجود دو آنومالی در راستای عمود برهم در بخش جنوب غربی (بخش انتهایی پروفیل‌های ۶ تا ۱۱ مقاومت‌ویژه) بود (شکل ۴-۱۰). این آنومالی‌ها در روش ERT به صورت مقاومت‌ویژه‌های بالاتر و در مقاطع روش GPR به صورت مناطق با عمق نفوذ بیشتر و انعکاسات با دامنه بیشتر نسبت به دیگر بخش‌ها در مقاطع قابل تشخیص هستند.
- ✓ قسمت میانی محوطه برداشت متشکل از رس ریز دانه با تراکم (فشردگی) کم است. این بخش در تمامی مقاطع مقاومت‌ویژه با مقاومت‌ویژه کمتر از ۱۰۰ اهم‌متر دیده می‌شود (شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷). در مقاطع GPR امواج در این بخش کمترین عمق نفوذ را دارند (شکل ۴-۱۹).
- ✓ به دلیل قدرت تفکیک ذاتی بالاتر روش GPR و شبکه طراحی شده متراکم‌تر برای این روش، انتظار بر این بود که تصاویر نهایی GPR از وضوح و قدرت تفکیک بالاتری برخوردار باشند ولی با توجه به رسانندگی بالای محیط به دلیل وجود میزان بالای رس، امواج GPR به سرعت مستهلک شده و عمق نفوذ به ندرت بیش از ۵۰ سانتی‌متر می‌شود در حالی که مقاطع مقاومت‌ویژه تا عمق ۱۲۰ سانتی-متری را آشکار می‌کنند.
- ✓ داده‌های ERT نسبت به داده‌های GPR از توانایی و وضوح بیشتری در تفکیک دیوارهای مدفون نسبت به زمینه برخوردار بودند. به عنوان مثال آنومالی A که در پروفیل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ الکترونیک به وضوح مشخص است در پروفیل‌های متناظر GPR (پروفیل‌های ۱۷ و ۱۹) دیده نمی‌شود و فقط در پروفیل شماره ۲۱ GPR قابل مشاهده است (شکل ۴-۲۰ الف). این مسئله احتمالاً به دلیل یکسان بودن جنس دیواره‌ها و زمینه می‌باشد. با توجه به کمپکت شدگی دیواره‌ها نسبت به زمینه، این دیوارها با مقاومت‌ویژه بالاتری در مقاطع مقاومت‌ویژه مشخص می‌گردند. در صورتی که تباین فیزیکی از نظر روش GPR بین دیوارها و زمینه وجود ندارد.

- ✓ برآورد عمق قرارگیری آنومالی‌ها و شکل هندسی آنها با داده‌های ERT راحت‌تر است.
- ✓ با توجه به عمق نفوذ کم امواج GPR علی‌رغم مراحل پردازش متنوعی که بر روی داده‌ها اعمال شد فیلترهای گوناگون در افزایش کیفیت داده‌ها مؤثر نبوده و بهترین حالت ممکن از اعمال توآمان دو فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک حاصل شد.
- ✓ در این تحقیق ۱۱ پروفیل مقاومت‌ویژه به طول ۲۰ متر (طول کلی ۲۲۰ متر) با استفاده از ۴ نیروی مجرب در زمان سه روز برداشت شد. در حالی که داده‌های GPR از ۲۱ پروفیل طولی و ۴۱ پروفیل عرضی به طول کلی ۸۳۰ متر در زمانی نزدیک به سه ساعت و با سه نیرو برداشت شد. بنابراین برداشت داده‌های GPR بسیار سریع‌تر از برداشت داده‌های ERT است.
- ✓ تاثیر عوامل و عوارض محیطی مانند توپوگرافی، ناهمواری‌های زمین، وجود پوشش گیاهی، تغییر در رطوبت زمین و ... بر عملیات برداشت و داده‌های ژئوالکتریک کمتر از داده‌ها و برداشت‌های GPR است، به طوری که افزایش چند درصدی رطوبت یا ناهمواری زمین بر روی عمق نفوذ و کیفیت داده‌های برداشت شده تأثیر نامطلوبی شدیدی دارد.
- ✓ سرعت و سهولت برداشت داده‌های GPR باعث شد تا پوشش شبکه برداشت طراحی شده این روش تقریباً ۴ برابر روش ERT باشد.
- ✓ با استفاده از این دو روش ژئوفیزیکی با ایجاد کمترین تغییرات در محیط، با هزینه‌ای بسیار کمتر نسبت به حفاری‌های اکتشافی در زمانی معادل با سه روز کاری و با استفاده از حداکثر چهار نیروی انسانی در محوطه‌ای که هیچ‌گونه نشانه سطحی دال بر وجود سازه‌ای در زیر سطح وجود نداشت، آنومالی‌هایی مبنی بر وجود سازه‌های باستانی مدفون به دست آمد.
- ✓ با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مطالعات باستان‌شناسی (همانند تحقیق حاضر) می‌توان محوطه‌های وسیع را با هزینه‌ای کم و به سرعت برداشت کرد و با استفاده از نتایج بدست آمده محدوده‌های

فاقد آنومالی را حذف نمود. بدین ترتیب می‌توان فرآیند کاوش‌ها را که عمدتاً شامل حفاری می‌شود را هدفمند و بهینه کرد و از حفاری‌های اضافه که خود مستلزم صرف هزینه و زمان زیادی هستند جلوگیری کرد. علاوه بر اینکه محیط نیز کمتر تحت تأثیر قرار می‌گیرد.

✓ در این تحقیق که در محیطی با میزان رس بالا (رسانندگی بالا) انجام شد روش ERT از کارآیی و قدرت تفکیک بالاتری نسبت به روش GPR برخوردار بوده است به طوری که تفسیر نتایج روش GPR به تنهایی به مراتب دشوارتر بود.

۵-۲- پیشنهادات

- استفاده از روش‌های متفاوت ژئوفیزیکی در کاوش‌های باستانی، مقایسه و تلفیق نتایج آنها با یکدیگر برای رسیدن به تفسیری مطلوب‌تر با درجه اطمینان بیشتر توصیه می‌شود.
- استفاده از آنتن‌های با فرکانس پایین‌تر که از عمق نفوذ بالاتری برخوردارند می‌تواند در شناسایی اعماق بیشتر در روش GPR مؤثر باشد.
- استفاده از شبکه برداشت با تراکم بیشتر برای داده‌های ERT، به علاوه برداشت چند پروفیل متقاطع برای کنترل داده‌ها توصیه می‌شود.
- در نهایت برای رسیدن به نتایج قطعی و پی‌بردن به صحت نتایج روش‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده حفاری منطقه بهترین راهکار ممکن است.
- استفاده از سیستم جدید برداشت مقاومت‌ویژه (کابل چند هسته‌ای به همراه واحد تغییر الکترودها) برای برداشت‌های مقاومت‌ویژه از جمله ERT باعث افزایش چشم‌گیر سرعت برداشت می‌شود. بنابراین استفاده از چنین سیستمی برای برداشت‌های مقاومت‌ویژه توصیه می‌شود.

منابع و مأخذ:

۱. اسحاقی، ا. (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "مقایسه و تلفیق داده‌های توموگرافی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین در اکتشاف لایه‌ها و قنات آب زیرزمینی در منطقه درخانیاب مجن شاهرود" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲. افشارفر ن.، (۱۳۸۵) "هزاره‌های تاریک تاریخ دامغان" انتشارات پازینه، تهران، ۱۶۸.
۳. امین پور ب.، (۱۳۸۶) بررسی مغناطیس‌سنجی محوطه دیوار دفاعی بزرگ گرگان پژوهشکده باستان‌شناسی.
۴. اویسی مؤخر م.، قاسمی و.، شاه نظری ح.، (۱۳۸۴)، مطالعه مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصرشیرین دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران
۵. قیصرانی ف.، (۱۳۸۷) "مبانی برق" شرکت چاپ و نشر کتاب‌های درسی ایران، تهران، ۲۰۳.
۶. محمدخانی ک.، (۱۳۸۳)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بررسی کاربرد روشهای ژئوفیزیکی اکتشافی در باستان‌شناسی، مطالعه موردی: بررسی مغناطیس‌سنجی درتخت جمشید و پاسارگاد" دانشکده علوم انسانی. دانشگاه تربیت مدرس
۷. محمدی ویژه م.، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه مزبور" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

8. Aitken, M. (1974) *Physics and archaeology*. Oxford University Press, pp. 300.

9. Arciniega-Ceballos, A., Hernandez-Quintero, E., Cabral-Cano, E., Morett-Alatorre, L., Diaz-Molina, O., Soler-Arechalde, A., Chavez-Segura, R. (2009) "Shallow geophysical

- survey at the archaeological site of San Miguel Tocuila, Basin of Mexico." *Journal of Archaeological Science* 36 ,: 1199-1205.
10. Arısoy, M.O., Özdemir, K., Büyüksarac, A., Funda, B. (2007). "Images of buried graves in Bayat, Afyon (Turkey) from high-resolution magnetic data and their comparison with preliminary excavations". *Journal of Archaeological Science*, Vol. 34, pp. 1473-1484.
 11. Baker, G., Jordan, T., Pardy, J. (2007) "An introduction to ground penetrating radar (GPR)" The Geological Society of America, special paper **432**, pp **181**.
 12. Constable, S.C., Parker, R.L. and Constable, C.G.(1987) "Occam's inversion : A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data." *Geophysics*,: 289-300.
 13. Conyers L. B., Goodman D. (2004) "*Ground-Penetrating Radar An Introduction for Archaeologists*". Altaamira press. USA. pp. **232**.
 14. Dey A., Morrison, H.F.(1979a) "Resistivity modelling for arbitrary shaped two-dimensional structures." *Geophysical Prospecting*,: 1020-1036.
 15. Dey A., Morrison, H.F.(1979b) "Resistivity modeling for arbitrarily shaped threedimensional shaped structures." *Geophysics* 44,: 753-780.
 16. Doolittle, J. A. (1982) "charecterizing soil map units with the groun penetrating aradar." *Soil Survey Horizons*,: 3-10.
 17. Ettore Cardarelli, Gerardian Di Filippo. (2009) "Integrated geophysical methods for the charecterisation of an archaeological siten(Massenzio Basilica - Roman forum, Rome, Italy)." *journal of applied geophysics* 68,: 508-521.
 18. Fisher, P. M., Follin S. G. .W. and P. Ulriksen. (1980) "Subsurface Interface Radar Survey at Hala Sultan Tekke, Cyprus." *Studies in mediterranean archaeology* **63**: **48-51**.
 19. Fullagar P. K., livleybrooks D. (1994) "trail of tunnel radar for cavity and ore detection in the sudbury mining camp, ontario." *waterloo center for groundwater research. waterloo*,. 883-894.

20. Griffith, D.J., (1981), Introduction to electrodynamics: Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall.
21. Inman, J.R. (1975)"Resistivity inversion with ridge regression." *Geophysics*,: 798-817.
22. Jol, H. M. (2009) *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Oxford: Elsevier Science,pp. 508.
23. Koefoed, O. (1979) *Geosounding Principles 1 : Resistivity sounding measurements*. Amsterdam: Elsevier Science Publishing Company.
24. Lines, L.R., Treitel, S.(1984) "Tutorial : A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems." *Geophysical Prospecting*,: 159-186.
25. Loke, M.H.(2004) *Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys.*
26. Martino, L., Bonomo, N., Lascano, E., Osella, A., Ratto, N. (2006) "Electrical and GPR prospecting at Palo Blanco archaeological site, northwestern Argentina." *Geophysics*,: B193-B199.
27. Mooney, H. M.(1980) *Hand book of engineering geophysics*. Vol. 2, Bison Instruments. Minneapolis
28. Olhoeft, G., (1998), Electrical, magnetic, and geometric properties that determine ground penetrating radar performance: proceedings of GPR '98, seventh international conference on Ground Penetrating Radar, University of Kansas, p. 177-182.
29. Packard, H., 1992, Basic of measuring the dielectric properties of materials: Application note 1217-1.
30. Papadopoulos, N., Yi, M., Kim J., Tsourlos, P., Tsokas, G. (2010) "Geophysical investigation of tumuli by means of surface 3D Electrical Resistivity Tomography" *Journal of Applied Geophysics* 70 192–205
31. Powers, M.H.,(1997) *Modeling frequency-dependent GPR: The Leading Edge*, November.

32. Reynolds, J.M. (1997) *“An Introduction to Applied and environmental Geophysics.”*
John Wiley and Sons Ltd. UK. pp **806**
33. Saaraketo, T., (1998), electrical properties of water in clay and silty soils: journal of applied Geophysics, v. 40, p. 73-78.
34. Sheets, P. D., Loker, W. M., Spetzler, H. A. W. and Ware, R. W. (1985) "Geophysical Exploration for Ancient Maya Housing at Ceren, El Salvador." National geographic research reports **20: 645-656**
35. Silvester, P.P., Ferrari, R.L.(1990) *Finite elements for electrical engineers (2nd. ed.)*.
Cambridge University Press.
36. Software & Sensors. (2001) "Win_EKKO user's Guide".
37. Ulaby, F.,(2001), *Fundamentals of applied electromagnetics*: Upper Saddle River, N.J.,
Prentice-Hall.
38. van Overmeeren R. A. (1994) "high speed georadar data acquisition for groundwater exploration in the netherlands." waterloo center for groundwater research. waterloo.,
1057-1073.
39. Vickers, R. S., Dolphin L. T. and Johnson D.. (1976) "archaeological investigations at chaco canyon using subsurface radar. In remote sensing experiments in cultural resource studies" university of new mexico. pp **81-101**
40. <http://en.wikipedia.org/wiki/SketchUp>
41. <http://maps.google.com>
42. <http://earth.google.com>
43. <http://www.nga.com>
44. <http://openlearn.open.ac.uk>
45. <http://www.sigmateh.co.rs>
46. <http://www.wara.com>

پیوست الف: معرفی نرم افزار Win_EKko Pro,V:1.0

Win_EKko Pro,V:1.0 یک بسته نرم افزاری برای ویرایش، پردازش و نمایش داده های GPR تولید شده توسط دستگاه های شرکت Sensors & Software می باشد. این نرم افزار تحت سیستم عامل ویندوز نوشته شده و برای کاربرانی که نیاز به ویرایش، پردازش و ترسیم حجم وسیعی از داده های GPR با سرعت و با کیفیت بالا دارند، طراحی شده است. همچنین این نرم افزار قادر است داده های تولید شده توسط دستگاه های GPR این شرکت را به فرمت های دیگری از قبیل SEG-Y، تبدیل کند. داده های GPR با تبدیل به این فرمت قابل پردازش توسط نرم افزارهای پیشرفته لرزه ای خواهند بود.

در شکل الف-۱ صفحه اصلی این نرم افزار به نمایش در آمده است. همانطور که از این شکل دیده می شود این نرم افزار از یک جدول قابل فهم و ساده برای نمایش مشخصات داده های GPR و همچنین پارامترهای برداشت، استفاده می کند. در هر سطر یک فایل GPR به صورت مجزا قرار گرفته است. هر یک از این فایل ها معمولاً یک پروفایل برداشتی GPR می باشند. حداکثر تعداد ستون های این جدول ۲۲ ستون می باشد. قابلیت نمایش و عدم نمایش هر یک از این ستون ها با استفاده از سربرگ Edit که در صفحه اصلی نرم افزار دیده می شود، در اختیار کاربر می باشد. در این ستون ها به ترتیب از چپ به راست، اطلاعاتی از قبیل نام فایل، موقعیت مکانی ابتدا و انتهای پروفایل ها، فواصل ایستگاهی، فاصله آنتن ها، واحد اندازه گیری فواصل، فرکانس مرکزی دستگاه، تعداد رده های برداشتی، پنجره زمانی و غیره به نمایش در آمده است. نمایش اطلاعات مربوط به داده های برداشتی و هر یک از پارامترهای برداشت به این شیوه، تشخیص سریع خطاهای موجود در داده های برداشتی را ممکن می سازد. کاربر می تواند به راحتی با راست کلیک بر روی ستون های مربوطه و مشاهده امکان های موجود ویرایش برای هر یک از پارامترهای برداشت، در حین مشاهده این پارامترها آنها را برای مراحل پردازش بعدی، تصحیح نماید. ویرایش و پردازش هر یک از فایل ها و یا تمام پروژه توسط این نرم افزار امکان پذیر است. همچنین یک روند پردازش مطلوب که تناسب آن برای پروژه ای خاص به اثبات رسیده است، در این نرم افزار قابل ذخیره

است. کاربر می‌تواند در هر مرحله آن را به صورت Recipes ذخیره کند تا در فعالیتهای بعدی با استفاده از سربرگ Recipes در شکل الف-۱ آن روال پردازشی را بازخوانی کرده و بر روی داده‌های دیگر اعمال کند.

The screenshot shows the Win_EKKO Pro software interface. The main window displays a table with the following columns: File Name, Start, Stop, Steps, Anten, Units, Frequ, # Tra, Time, and # Poi. The table contains 14 rows of data, labeled LINEX0 through LINEX13. Below the table, there is a 'Processing' section with 'Process' and 'Properties' tabs, and an 'Apply' button.

File Name	Start ...	Stop ...	Steps...	Anten...	Units	Frequ...	# Tra...	Time ...	# Poi...
LINEX0	0.0	21.025	0.025	0.2794	m	250.0	842	34	86
LINEX1	20.0	-1.05	-0.025	0.2794	m	250.0	843	34	86
LINEX2	0.0	20.875	0.025	0.2794	m	250.0	836	34	86
LINEX3	20.0	-0.825	-0.025	0.2794	m	250.0	834	34	86
LINEX4	0.0	20.95	0.025	0.2794	m	250.0	839	34	86
LINEX5	20.0	-0.975	-0.025	0.2794	m	250.0	840	34	86
LINEX6	0.0	20.875	0.025	0.2794	m	250.0	836	34	86
LINEX7	20.0	-1.0	-0.025	0.2794	m	250.0	841	34	86
LINEX8	0.0	20.825	0.025	0.2794	m	250.0	834	34	86
LINEX9	20.0	-0.875	-0.025	0.2794	m	250.0	836	34	86
LINEX10	0.0	20.9	0.025	0.2794	m	250.0	837	34	86
LINEX11	20.0	-0.9	-0.025	0.2794	m	250.0	837	34	86
LINEX12	0.0	21.0	0.025	0.2794	m	250.0	841	34	86
LINEX13	20.0	-1.0	-0.025	0.2794	m	250.0	841	34	86

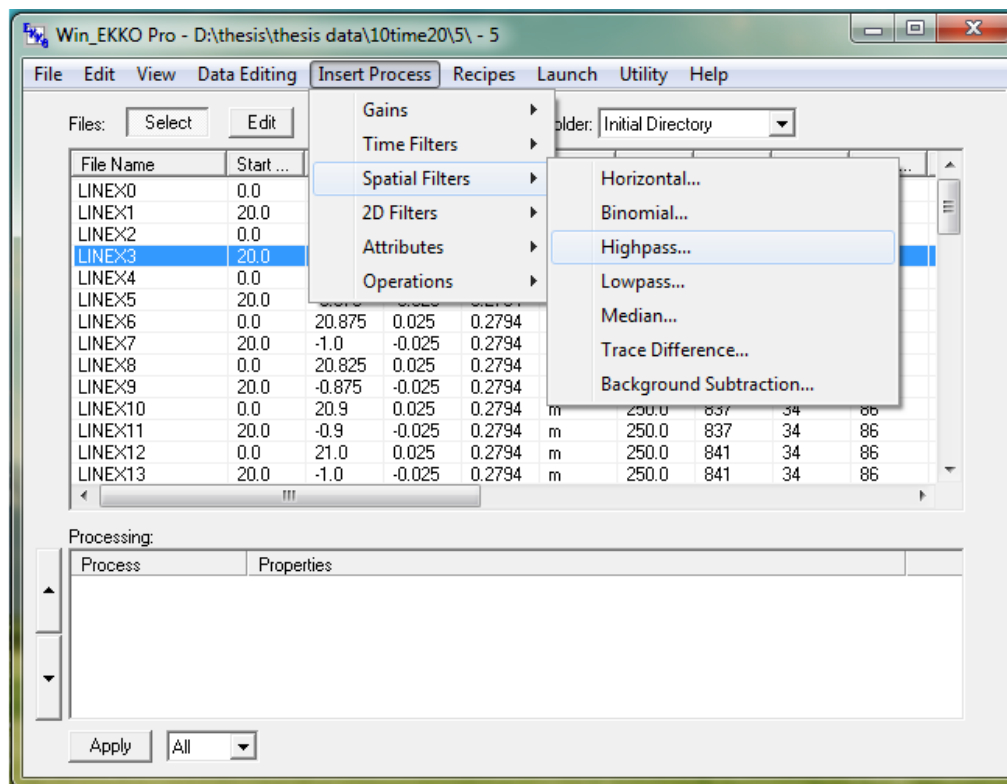
شکل الف-۱: صفحه اصلی نرم افزار Win_EKKO Pro

در این نرم‌افزار بر خلاف برخی دیگر از نرم‌افزارهای موجود این شرکت، اعمال روند پردازش و پارامترهای هر عملگر پردازش، به صورت تام در اختیار کاربر می‌باشد. به این ترتیب که در هر مرحله از پردازش با مشاهده مقاطع، رده‌های جداگانه، میانگین طیف فرکانس و میانگین دامنه بر حسب زمان، موفقیت و یا عدم موفقیت در یک روند پردازش، توسط کاربر قابل درک است.

در این نرم‌افزار داده‌های اولیه در یک پوشه اولیه ذخیره شده و داده‌های ویرایش و پردازش یافته در زیر پوشه‌ای از داده‌های اولیه قرار می‌گیرند. از این‌رو داده‌های اولیه بدون هیچ تغییری دست نخورده باقی مانده و مجدداً در هر زمانی می‌توان برای فعالیت‌های بعدی از آنها استفاده کرد. در هر مرحله از پردازش و اعمال یک روند ویرایش و پردازش خاص، می‌توان داده‌ها را در یک زیر پوشه جدید ذخیره کرد. به این ترتیب در هر مرحله امکان مقایسه مقاطع به دست آمده از پردازش‌های مختلف نیز وجود خواهد داشت.

ویرایش داده‌ها شامل ۲۵ عملیات مختلف است. اعمال این عملیات با استفاده از سربرگ Edit و یا با راست کلیک بر روی ستون‌های پارامترهای مورد نظر امکان پذیر است. از جمله این موارد می‌توان به گزینه‌های ترکیب افقی و عمودی داده‌ها، اضافه کردن داده‌های توپوگرافی، تبدیل فرمت داده‌ها، ویرایش اطلاعات مربوط به داده‌های عنوان از جمله فاصله و فرکانس آنتن‌ها، تصحیح موقعیت ابتدا و انتهای پروفیل‌ها و فواصل ایستگاهی، انتخاب یا حذف قسمتی از داده‌های GPR برای نمایش آنها، تغییر جهت پروفیل، حذف ردهای تکراری و درون-یابی ردهای جا مانده اشاره کرد.

اولین مرحله از پردازش داده‌ها ساخت یک فهرست از عملیات پردازش است. همان‌طور که در شکل الف-۲ دیده می‌شود، پنجره پردازش در زیر جدول داده‌ها در صفحه اصلی نرم‌افزار قرار گرفته است. عملیات پردازش انتخابی در این پنجره فهرست می‌شوند و به ترتیب اولویتی که کاربر تعریف می‌کند، قابل اعمال بر داده‌ها می‌باشند. مراحل پردازش با استفاده از سربرگ Insert Processing به این لیست اضافه می‌شوند و با انتخاب فایل مورد نظر، روند پردازش مربوطه بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. در صورت بروز خطا در پارامترهای پردازش در هر عملگر پردازش، در این پنجره امکان تصحیح پارامترهای مورد نظر و تغییر روند و توالی عملگرهای پردازش در این پنجره وجود خواهد داشت. مراحل پردازش به صورت انفرادی و یا کلی قابل اعمال بر داده‌ها می‌باشند. این امکان از گزینه Apply در پایین جدول داده‌ها در شکل الف-۲ موجود است.



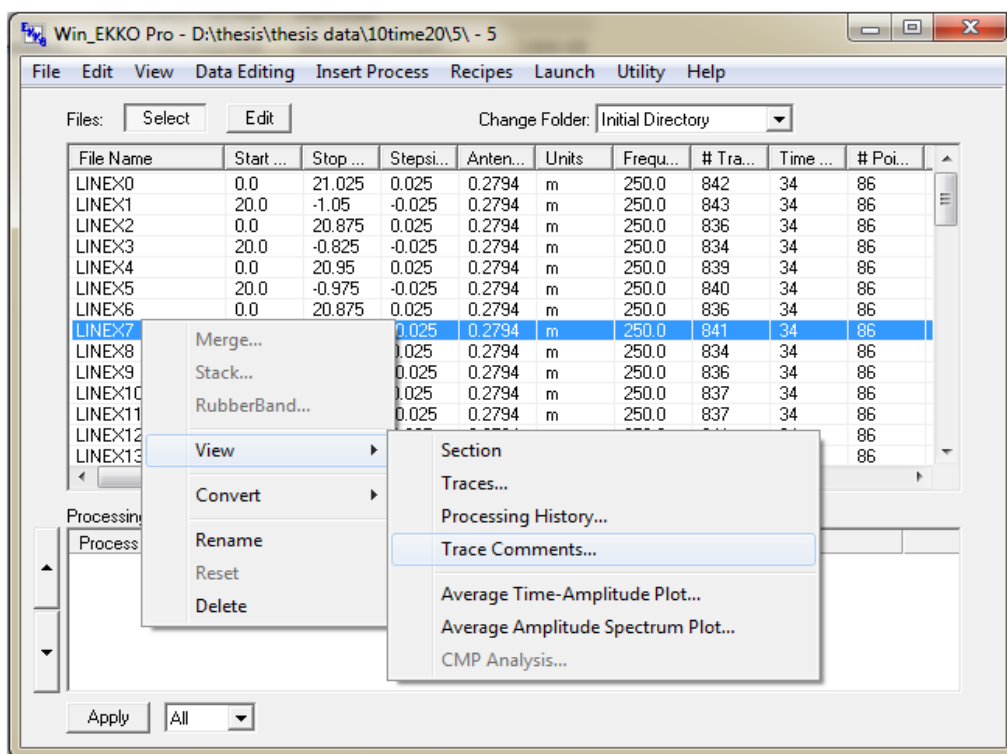
شکل الف-۲: اعمال عملگرهای پردازش که از سربرگ Insert Processing امکان پذیر است

پردازش داده‌ها شامل ۳۰ عملگر پردازش مختلف می‌باشد. از مهمترین این عملگرها می‌توان به انواع بهره‌ها، فیلترهای زمانی نظیر Dewow، فیلترهای بالاگذر، پایین‌گذر و میان‌گذر، انواع فیلترهای مکانی برای حذف بازتاب‌کننده‌های افقی و افزایش اثر بازتاب‌کننده‌های شیب‌دار نظیر بالاگذر، تفاضل ردها و تفاضل زمینه اشاره کرد. از جمله فیلترهای مکانی دیگر می‌توان فیلتر افقی و پایین‌گذر برای حذف بازتاب‌کننده‌های شیب‌دار و افزایش اثر بازتاب‌کننده‌های افقی را نام برد. این نرم‌افزار قابلیت اعمال پردازش‌هایی نظیر مهاجرت، مشخصه-های دامنه، فاز و فرکانس بر روی داده‌ها را دارا می‌باشد.

توضیح و حتی معرفی تمام این گزینه‌ها در خصوص ویرایش و پردازش داده‌ها در این مجال کم میسر نیست و برای مطالعه بیشتر در این زمینه مراجعه به راهنمای این نرم‌افزار خالی از فایده نیست. چه بسا برای درک بهتر

تئوری و روند پردازش داده‌ها مراجعه به منابعی در خصوص پردازش داده‌های لرزه‌ای می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

نمایش داده‌های GPR با استفاده از سربرگ View امکان‌پذیر است. همچنین همان‌طور که در شکل الف-۳ دیده می‌شود با راست کلیک بر روی نام پروفایل‌های مورد نظر، مشاهده مقاطع دو بعدی داده‌های GPR، ردهای جداگانه، پردازش‌های به کار رفته بر روی هر یک از فایل‌ها، اطلاعات مربوط به ردها که در حین برداشت و یا بازبینی داده‌ها به آنها اضافه می‌شوند، امکان‌پذیر است. لازم به توضیح است که این نرم‌افزار به صورت مستقل قادر به نمایش مقاطع دو بعدی داده‌های GPR نبوده و برای مشاهده این مقاطع از نرم‌افزار Transform استفاده می‌شود. این نرم‌افزار به صورت مختصر در پیوست ج معرفی شده است.



شکل الف-۳: نمایش داده‌های GPR با راست کلیک بر روی نام فایل مورد نظر امکان‌پذیر است.

پیوست ب: معرفی نرم‌افزار EKKO Mapper, V:2.0

داده‌های GPR معمولاً به صورت مقاطع دوبعدی عمقی و یا زمانی از ساختارهای زیرسطحی نمایش داده می‌شوند. در مناطقی که تعداد خطوط و پروفیل‌های برداشتی بالا باشد، تفسیر تعداد زیادی از این پروفیل‌ها به صورت مقاطع معمول GPR خسته کننده و در پاره‌ای از موارد گیج کننده است. برای اجتناب از این موارد داده‌های GPR بصورت مقاطع افقی از منطقه برداشت نمایش داده می‌شوند. نمایش داده‌های GPR به این شیوه می‌تواند اطلاعات دیگری در اختیار کاربر قرار دهد. برای مثال در این شیوه از نمایش برخلاف نمایش معمول مقاطع GPR، اهداف خطی نظیر لوله‌ها و کابل‌ها به صورت خطی و اهداف ایزوله نظیر تخته سنگ‌ها به صورت اهداف نقطه‌ای دیده می‌شوند. این اهداف در شیوه‌های معمول نمایش داده‌های GPR، پاسخ‌های یکسانی از خود نشان می‌دهند و متمایز ساختن این پاسخ‌ها توسط مفسر در پاره‌ای از موارد با مشکلاتی همراه است. همچنین در این شیوه از نمایش تفسیر حجم بالایی از داده‌ها GPR با سرعت بالایی، امکان پذیر است.

این نرم‌افزار برای تولید مقاطع افقی از منطقه‌ای که داده‌های آن در شبکه‌ای منظم برداشت شده‌اند، طراحی شده است. این نرم‌افزار قابلیت تولید نقشه‌های نفوذ امواج، نقشه نوفه‌های محیطی و مقاطع افقی عمقی و زمانی داده‌های GPR را دارا می‌باشد. علاوه بر این، قابلیت اعمال پردازش‌های مختلف بر داده‌ها را دارا می‌باشد. لازم به توضیح است که دامنه پردازش‌های موجود در این نرم‌افزار در مقایسه با نرم‌افزار Win_EKKO_Pro که در پیوست الف معرفی شد، بسیار پایین تر است. این نرم‌افزار همچنین قابلیت نمایش مقاطع عمقی و زمانی هر یک از پروفیل‌های GPR به صورت مجزا نظیر آنچه که در نرم‌افزار Win_EKKO_Pro با آن مواجه‌ایم را دارا می‌باشد. به این ترتیب بررسی‌های جزئی‌تر در هر قسمت از مقاطع تولید شده، امکان پذیر است.

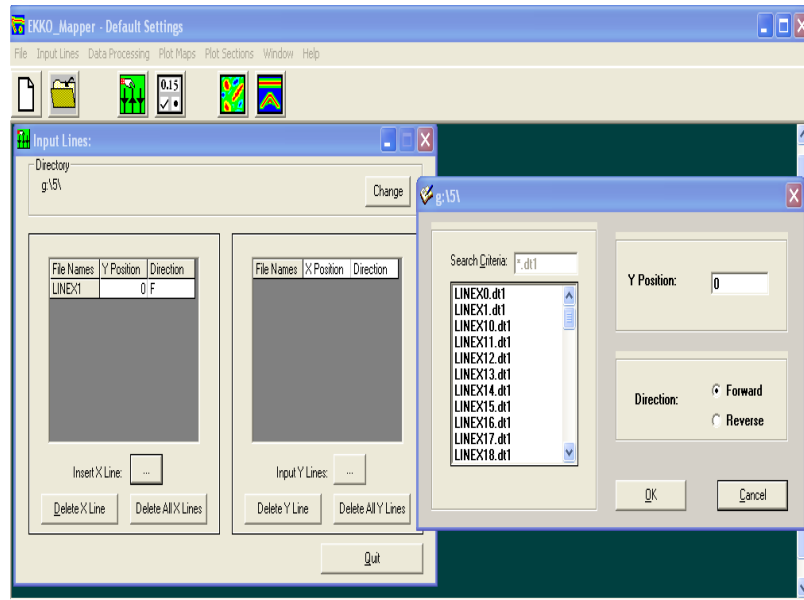
برای اینکه داده‌های GPR را بتوان با استفاده از این نرم‌افزار به صورت مقاطع افقی به نمایش در آورد، پروفیل‌های GPR بایستی به صورت خطوط موازی و یا در شبکه‌ای منظم برداشت شوند. برای آنکه کاربر بتواند اهداف

مورد نظر را بعد از پردازش و تفسیر داده‌ها تعیین موقعیت نماید، دقت و صحت موقعیت پروفیل‌های انتخابی بسیار حیاتی است.

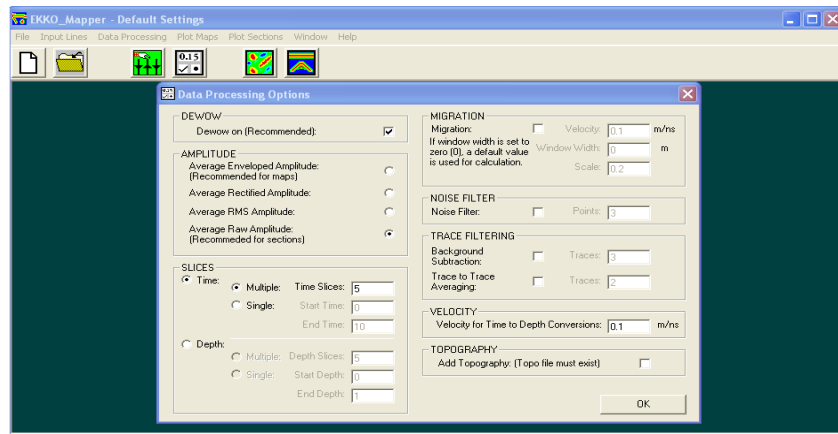
در این نرم‌افزار بدون اینکه کاربر نقشی در انتخاب روند پردازش داده‌ها داشته باشد با انتخاب عملگرهای پردازش و پارامترهای مناسب برای هر عملگر، یک روند پردازش از پیش تعریف شده توسط شرکت سازنده، بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. از این رو کاربران غیرمغرب در زمینه پردازش داده‌ها GPR نیز با داشتن اطلاعات نسبی در این زمینه قادر به استفاده از آن می‌باشند.

برای استفاده از این نرم‌افزار بعد از بازخوانی پروژه مورد نظر که تمام پروفیل‌های برداشتی از قبل در یک پوشه قرار گرفته‌اند، با توجه به جهت برداشت (X یا Y) موقعیت ایستگاه ابتدایی برداشت و فاصله پروفیل‌ها، پروفیل‌های مورد نظر انتخاب می‌شوند. این امکان با استفاده از سربرگ Input Lines که در صفحه اصلی نرم‌افزار در شکل ب-۱ و ب-۲ به نمایش درآمده، برای کاربر مهیا است. با استفاده از سربرگ Data Processing پردازش‌های مناسب برای هدف مورد مطالعه و به دست آوردن نقشه‌های مورد نظر بر داده‌ها اعمال می‌شود. پنجره پردازش در شکل ب-۲ به نمایش درآمده است. بعد از انتخاب پردازش‌های مناسب با استفاده از سربرگ Plot Maps انتخاب‌های موجود برای تولید نقشه‌های مورد نظر در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

توضیح و معرفی کامل این نرم‌افزار نیز در این مجال کم میسر نبوده و مطالب ذکر شده معرفی مختصر گزینه‌های با اهمیت این نرم‌افزار از نظر نویسندگان است. لیکن برای مطالعه و همچنین کاربری این نرم‌افزار مراجعه به راهنمای آن می‌تواند بسیار مفید واقع شود.



شکل ب-۱: انتخاب پروفیل های برداشتی از یک پروژه برای تولید برش های عمقی از منطقه برداشت



شکل ب-۲: پنجره پردازش داده ها در نرم افزار EKKO Mapper

پیوست ج: 3.4 Transform V

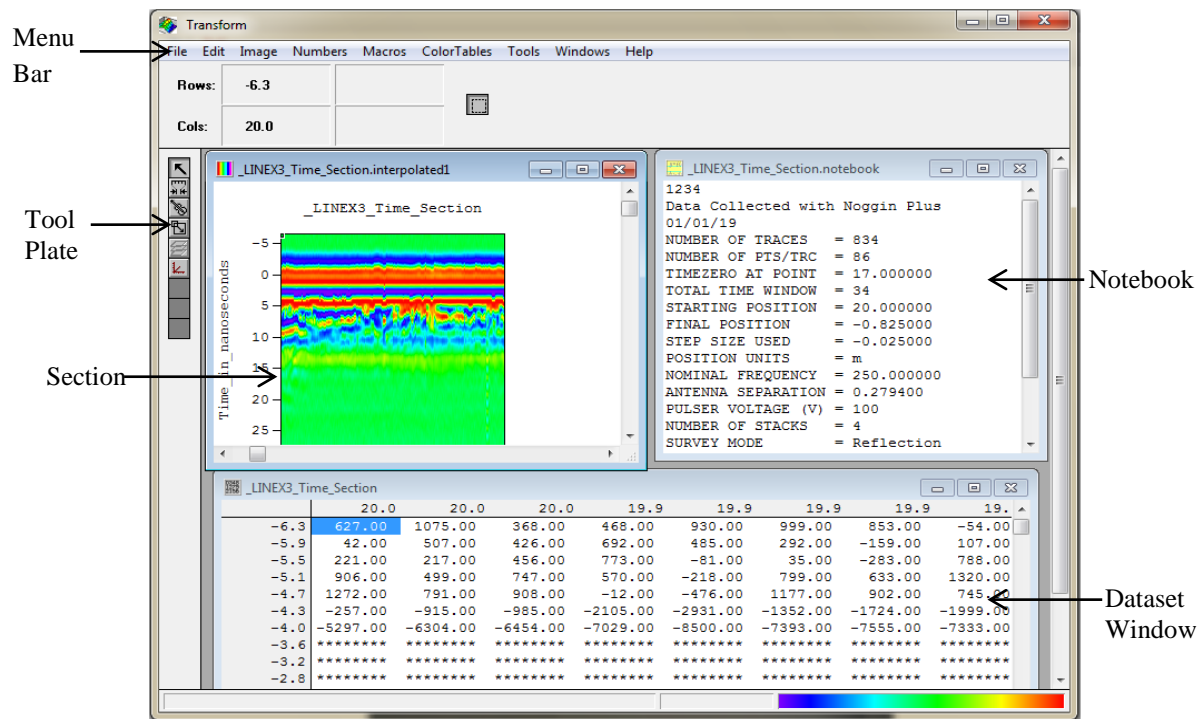
این نرم‌افزار یک نرم‌افزار علمی و تجسمی¹ قدرتمند از مجموع نرم‌افزارهای Fortner بوده که توسط بخش "NCSA" در دانشگاه ایلینویز توسعه یافته است. توسط این نرم‌افزار می‌توان میزان داده‌های وسیعی را بصورت گرافیکی به نمایش درآورد و به تجزیه و تحلیل آنها پرداخت. این نرم‌افزار به منظور نمایش و تجزیه و تحلیل دوبعدی داده‌های با دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته به صورت نقشه‌های مختلف، طراحی شده است. در ژئوفیزیک به طور گسترده‌ای با چنین نقشه‌هایی روبه‌رو هستیم. مقاطع عمقی و زمانی داده‌های GPR در فصل چهار این پایان‌نامه از جمله این موارد می‌باشد. به عنوان مثال در مقاطع عمقی داده‌های GPR، فواصل ایستگاهی و عمقی متغیر مستقل و دامنه سیگنال GPR متغیر وابسته می‌باشد.

توسط این نرم‌افزار می‌توان داده‌ها را به صورت یکی از هفت نمایش گرافیکی زیر نمایش داده و به تحلیل آنها پرداخت.

- ۱- تصاویر پیکسلی
- ۲- تصاویر درون‌یابی شده
- ۳- نمودارهای خطی
- ۴- نقشه‌ها کنوری
- ۵- نقشه‌های سطحی
- ۶- نمودارهای هیستوگرام
- ۷- نقشه‌های برداری

¹ Visualization

از قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به نمایش چندگانه از داده‌ها و نقشه‌ها اشاره کرد. در شکل ج-۱ صفحه اصلی این نرم‌افزار به همراه معرفی قسمت‌های مختلف آن آورده شده است. در این شکل یک نمونه از مقطع رسم شده توسط نرم‌افزار و اطلاعات همراه آن نشان داده شده است.



شکل ج-۱: صفحه اصلی نرم‌افزار Transform و پنجره‌های آن

بطور کلی از مهمترین قابلیت‌های این نرم‌افزار می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ نمایش آرایه‌های دوبعدی به صورت جدولی
- ✓ تولید انواع تصاویر، نقشه‌ها و نمودارهایی که در ابتدا به آنها اشاره شد.
- ✓ قرار داده هر یک از نقشه‌های تولید شده برروس نقشه‌های دیگر

✓ نمونه‌گیری مجدد از داده‌ها

✓ درون‌یابی یا جاگذاری نقاط برداشت نشده در یک پروفیل

✓ دسترسی و نمایش مقادیر پارامترهای مورد نظر در نقاط مختلف نقشه

✓ تولید فرمول، توضیحات و نمادسازی برای داده‌های مختلف

✓ انتقال داده‌های مورد نظر به نرم‌افزارهای دیگر

همان‌طور که در طول پایان‌نامه به آن اشاره شد برای نمایش داده‌های GPR از این نرم‌افزار استفاده شده است. در صورتی که این نرم‌افزار در مسیر پیش فرض آن نصب شود، داده‌های تولید شده توسط نرم‌افزارهایی که در پیوست‌های الف و ب به معرفی آنها پرداختیم به صورت اتوماتیک به این نرم‌افزار منتقل می‌شوند. به این ترتیب که با انتخاب گزینه رسم مقطع در نرم‌افزارهای مزبور داده‌ها به این نرم‌افزار منتقل شده و نقشه‌های درون‌یابی شده در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics

MSc Thesis in Exploration Geophysics

Application of geophysical methods Ground penetrating radar (GPR) and
Electrical Resistivity Tomography (ERT) in archaeological investigations, a case
study Tepe Hissar archaeological site

By:

Arjang Rashmehe Karim

Supervisors:

Dr. Abolghasem Kmakar Rohani

Dr. Ali Reza Arab-Amiri

Advisor:

Ali Akbar Rajabi

JUN 2012

This research was aimed to combine the results of ERT and GPR methods to achieve a better view of subsurface and having a more accurate interpretation. Finally investigating both methods capabilities and weak points in comparison to each other in archaeological investigation.

There were some assumptions concerning site conditions. Any buried structure is probably denser than its surrounding material. As a result it should be more resistive than the surrounding environment. This is the contrast that geoelectrical methods can detect. If the assumption comes true the decay rate of GPR waves in surrounding materials will be faster than the buried structure, therefore in GPR sections they will be visible in the form of areas with lower depth of penetration. If an empty space (grave or furnace) exists in subsurface, its resistivity will be much higher than its surrounding, and its electromagnetic contrast will be enough to be detected by GPR. In both cases (existing a buried structure or an empty space) there would be enough physical contrast between the archaeological targets and their surrounding environment for both geophysical methods.

The acquisition grid was designed, then data were collected and appropriate processes were applied on the data. The results of both methods were in good agreement and indicated the presence of anomalies in the south-west of the study area surrounded by fine particle textured clay. Concerning the shape and the size of the detected anomalies, they probably related to the remaining section of buried walls. The buried walls in ERT method are seen by high resistivity areas and the surroundings can be seen as low resistivity parts. In GPR sections the walls can be distinguished from the surrounding environment with higher depth of penetration. GPR is much faster than ERT; however the GPR waves have been rapidly attenuated because of high conductivity of the study area. In this study ERT could detect greater depths and had better resolution than GPR.