

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه 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

دانشجو

مهدی محمدی ویژه

اساتید راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

دکتر محسن اویسی مؤخر

استاد مشاور
دکتر ایرج پیروز

تیر ۱۳۸۷

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادر مهربانم

تقدیر و تشکر

ممد و سپاس فقط شایسته ذات اوست.

پس از ممد باری تعالی بر خود واجب می‌دانم نسبت به اساتید گرانقدر خود که در زمان تمصیل در این دانشگاه آنچه نمی‌دانستم و نپرسیدم به من آموختند، بی نهایت قدردان باشم. از جناب دکتر پیروز به خاطر تمام بزرگواری‌هایشان، از جناب دکتر مرادزاده به دلیل ایجاد انگیزه در تحقیق و تلاش علمی سفت‌گیرانه و بلافاصله از جناب دکتر کامکار (رومانی که برای راهنمایی این پایان‌نامه از هیچ کمی فروگذاری نکرده و بی شک سهم عمده‌ای در به پایان رساندن این تحقیق داشته است، سپاس‌گذارم. از همه اساتیدی که با خلوص نیت در تلاشند جامعه‌ای متعالی بسازند، قدردانی می‌کنم. همچنین از آقایان دکتر اویدی و دکتر پیروز که زحمت راهنمایی و مشاوره این پایان‌نامه را به عهده داشته‌اند، تشکر می‌کنم.

از داوران محترم جناب دکتر مرادزاده و دکتر کرمی که زحمت داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفته‌اند، بی نهایت قدردان می‌باشم. از تمامی اساتید و کارمندان دانشکده معدن و ژئوفیزیک به ویژه جناب دکتر دولتی، آقای شاه مسینی و مهندس کبیریان، سپاس‌گذارم. در پایان از تمام دوستان و هم‌کلاسی‌های عزیزم که صبورانه مرا تحمل کردند، تشکر می‌کنم. زبان از سپاسی درخور همه شما عزیزان که مرا یاری فرمودید قاصر است.

امیدوارم که در سایه عنایت‌های الهی همیشه سلامت و پیروز باشید.

مهدی محمدی ویژه

E-mail: m_vizhe@yahoo.com

چکیده

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) یکی از روش‌های با قدرت تفکیک بالای ژئوفیزیک است که از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا برای آشکارسازی ساختارهای کم عمق زیرسطحی بهره می‌برد. آب‌های زیرسطحی و لوله‌های مدفون در خاک دارای تباین خوبی در مشخصه‌های الکترومغناطیس با محیط‌های اطراف خود می‌باشند. در این مطالعه به پردازش و تفسیر داده‌های GPR پرداخته شده بر روی این اهداف پرداخته‌ایم. به منظور بررسی مزایا و معایب روش GPR در مقایسه با روش مقاومت ویژه، برداشت‌های الکتریکی با روش مذکور بر روی اهداف مزبور نیز صورت گرفته است. داده‌های GPR با استفاده از نرم افزارهای Win_EKKO Pro و EKKO_Mapper پردازش و توسط نرم افزار Transform به نمایش درآمده‌اند. همچنین برای مدل سازی و تفسیر کمی داده‌های مقاومت ویژه، نرم افزار Res2dinv مورد استفاده قرار گرفته است.

روش GPR در مقایسه با روش مقاومت ویژه، از قدرت تفکیک بالاتری برخوردار می‌باشد، در صورتی که روش مقاومت ویژه حتی قادر به تفکیک ساختارهای با تباین بالای مقاومت ویژه در مجاورت یکدیگر، نبوده است. قدرت تفکیک و خصوصاً عمق نفوذ روش GPR به شدت تحت تأثیر مشخصه‌های الکترومغناطیس محیط‌های زیرسطحی است. رسانندگی محیط‌های زیرسطحی به شدت عمق نفوذ روش GPR را محدود کرده و آشکارسازی مجرای قنات آب در اعماق بیش از ۲ متر در این‌گونه محیط‌ها، به دلیل رسانندگی بسیار بالای خاک‌های سطحی، امکان‌پذیر نمی‌باشد. به دلیل نزدیک بودن مقاومت ویژه آب به رسوبات اطراف قنات روش مقاومت ویژه نیز در آشکارسازی قنات آب موفقیت قابل توجهی نداشته، ولی در مقایسه با روش GPR موفق‌تر عمل کرده است. روش GPR در آشکارسازی مرزهای ناگهانی که مشخصه‌های الکترومغناطیس در مرز بین اهداف زیرسطحی و محیط دربرگیرنده آنها به صورت ناگهانی تغییر می‌کند، بسیار موفق بوده است. از آنجا که سازه‌های انسانی معمولاً دارای چنین مرزهایی با محیط اطراف خود هستند، روش GPR در آشکارسازی آنها موفقیت چشم‌گیری داشته است. از مسائلی که در استفاده از روش GPR بایستی به خوبی مد نظر قرار گیرند، پردازش داده‌ها است. شیوه‌های پردازش با توجه به نتایج مورد انتظار بر روی داده‌ها اعمال می‌شوند و با انتخاب صحیح پردازش‌های متفاوت بر روی یک‌سری از داده‌ها، می‌توان به اطلاعات قابل توجهی دست یافت.

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات

۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- کاربردهای روش GPR	۳
۳-۱- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه GPR	۴
۴-۱- ضرورت انجام تحقیق	۶
۵-۱- هدف از انجام مطالعه حاضر	۷
۶-۱- ساختار پایان نامه	۸

فصل دوم: GPR و پردازش و تفسیر داده‌های آن

۱-۲- اصول و تئوری روش GPR	۱۲
۱-۱-۲- دستگاه GPR	۱۲
۲-۱-۲- انتشار امواج GPR در زمین	۱۵
۳-۱-۲- بازتاب و عبور	۱۹
۴-۱-۲- عمق نفوذ امواج GPR	۲۳
۵-۱-۲- قدرت تفکیک	۲۴
۲-۲- شیوه‌های برداشت داده	۲۶
۱-۲-۲- پروفیل‌زنی بازتابی یا دور افت مشترک	۲۶
۲-۲-۲- برداشت‌های CMP/WARR	۲۷
۳-۲-۲- توموگرافی GPR	۲۸
۳-۲- پردازش داده‌های GPR	۲۹
۱-۳-۲- تصحیح جابه‌جایی صفر زمانی	۳۰
۲-۳-۲- تصحیح اشباع سیگنال	۳۱
۳-۳-۲- به‌کارگیری بهره‌ها	۳۳
۴-۳-۲- اعمال فیلترها	۳۵

۳۸	۵-۳-۲- تصحیحات توپوگرافی
۳۸	۶-۳-۲- مهاجرت
۴۱	۷-۳-۲- روال پردازش داده‌ها
۴۲	۴-۲- تفسیر داده‌های GPR

فصل سوم: روش‌های الکتریک

۴۷	۱-۳- روش مقاومت ویژه
۴۸	۳-۱-۱- مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی
۵۰	۳-۱-۲- روش‌های اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه
۵۲	۳-۱-۳- آرایش‌های الکتروودی مورد استفاده
۵۲	۳-۱-۳-۱- آرایش وئر
۵۳	۳-۱-۳-۲- آرایش دوقطبی-دوقطبی
۵۴	۳-۲- روش پلاریزاسیون القایی (IP)
۵۵	۳-۲-۱- منشاء IP

فصل چهارم: اندازه‌گیری داده‌ها بر روی قنات آب

۶۰	۴-۱- برداشت داده‌های GPR و مقاومت ویژه
۶۴	۴-۲- اندازه‌گیری بر روی مرزهای ناگهانی
۷۱	۴-۳- اندازه‌گیری بر روی پروفیل‌های ابتدایی
۷۱	۴-۳-۱- اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه
۷۹	۴-۳-۲- اندازه‌گیری‌های GPR
۸۶	۴-۴- اندازه‌گیری بر روی پروفیل‌های میانی تا انتهایی
۸۶	۴-۴-۱- اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه
۱۰۵	۴-۴-۲- اندازه‌گیری‌های GPR بر روی پروفیل‌های میانی تا انتهایی

فصل پنجم: اندازه‌گیری بر روی لوله‌های مدفون

- ۵-۱- اندازه‌گیری بر روی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی ۱۱۰
- ۵-۱-۱- اندازه‌گیری‌های GPR ۱۱۰
- ۵-۱-۲- اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه ۱۱۷
- ۵-۲- لوله مدفون در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا ۱۲۰
- ۵-۳- اندازه‌گیری‌های GPR بر روی لوله‌های تأسیساتی ۱۲۲

فصل ششم: بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۶-۱- بحث و نتیجه‌گیری ۱۲۶
- ۶-۲- پیشنهادات ۱۲۹
- فهرست منابع ۱۳۱
- پیوست الف: معرفی نرم افزار Win_EKKO Pro ۱۳۴
- پیوست ب: معرفی نرم افزار EKKO_Mapper ۱۴۱
- پیوست ج: معرفی نرم افزار Transform, ۱۴۴

فهرست اشکال

فصل دوم: GPR و پردازش و تفسیر داده‌های آن

- شکل ۱-۲: تعداد مقاله‌های چاپ شده با موضوع GPR ۱۱
- شکل ۲-۲: اجزاء تشکیل دهنده سیستم GPR ۱۳
- شکل ۳-۲: یک پالس منفرد GPR (الف) به همراه طیف فرکانس آن (ب) ۱۴
- شکل ۴-۲: ضخامت منطقه گذار برای رسوبات با اندازه دانه‌ای مختلف (الف) به همراه مدل دی‌الکتریک آن (ب) ۲۱
- شکل ۵-۲: حداکثر عمق نفوذ قابل دسترس در مواد زمین‌شناسی مختلف به صورت تابعی از فرکانس مورد استفاده ۲۳
- شکل ۶-۲: ردپای GPR که به دلیل طبیعت دو قطبی امواج GPR بیضی شکل است ۲۵
- شکل ۷-۲: شکل شماتیک از پروفیل‌زنی دورافت مشترک (سمت چپ)، به همراه مقطع زمانی آن (سمت راست) ۲۷
- شکل ۸-۲: پردازش داده‌های GPR ۳۰
- شکل ۹-۲: اثر wow بر داده‌های GPR (سمت چپ). بازتاب‌ها بعد از اعمال فیلتر Dewow به خوبی مشخصند (سمت راست) ۳۲
- شکل ۱۰-۲: یک رد منفرد از یک پروفیل GPR قبل و بعد از به‌کارگیری کنترل بهره اتوماتیک (AGC) بر روی آن ۳۴
- شکل ۱۱-۲: نوفه‌های محیطی فرکانس بالا که بر روی بازتاب‌های اولیه قرار گرفته‌اند و آنها را مغشوش کرده‌اند ۳۶
- شکل ۱۲-۲: در داده‌های مهاجرت نیافته، بازتاب کننده واقع در هر قسمت جبهه موج در محل ایستگاه برداشت به نمایش در می‌آید ۳۹
- شکل ۱۳-۲: به نقشه درآوردن شکستگی‌ها در سنگ‌های آذرین درونی ۴۴

فصل سوم: روش‌های الکترونیک

- شکل ۱-۳: آرایش چهار الکتروودی ۴۸

شکل ۳-۲: آرایش وئر ۵۳

شکل ۳-۳: آرایش دوقطبی-دوقطبی محوری ۵۳

شکل ۳-۴: انتگرال $V(t)$ در یک فاصله زمانی ۵۵

فصل چهارم: اندازه‌گیری داده‌ها بر روی قنات آب

شکل ۴-۱: قسمت‌های مختلف قنات ۵۹

شکل ۴-۲: عکس هوایی از محل برداشت داده‌ها، به همراه پروفیل‌های برداشت و نقاط

برداشت GPS ۶۲

شکل ۴-۳: مقطع زمانی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۶۴

شکل ۴-۴: مقطع عمقی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۶۶

شکل ۴-۵: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری وئر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر

روی پروفیل صفر ۷۰

شکل ۴-۶: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل صفر ۷۰

شکل ۴-۷: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری وئر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر

روی پروفیل ۱ ۷۲

شکل ۴-۸: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۱ ۷۲

شکل ۴-۹: مقطع قائم از رسوبات سطحی منطقه برداشت، این مقطع دارای امتدادی

عمود بر راستای پروفیل ۱ و به فاصله ۵ متر از ابتدای آن واقع است ۷۳

شکل ۴-۱۰: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری وئر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر

روی پروفیل ۲ ۷۵

شکل ۴-۱۱: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۲ ۷۵

شکل ۴-۱۲: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری وئر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر

روی پروفیل ۳ ۷۸

شکل ۴-۱۳: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۳ ۷۸

شکل ۴-۱۴: مقطع عمقی داده‌های GPR برای پروفیل ۱ با اعمال فیلتر Dewow، پردازش

مهاجرت و بهره اتوماتیک ۷۹

- شکل ۴-۱۵: میانگین دامنه سیگنال بر حسب زمان برای پروفیل صفر و پروفیل ۱ ۸۱
- شکل ۴-۱۶: میانگین طیف فرکانس بازگشتی در آنتن گیرنده برای پروفیل صفر (الف) ۸۲
- و پروفیل ۱ ۸۲
- شکل ۴-۱۷: مقطع عمقی داده‌های GPR برای پروفیل ۲ با اعمال فیلتر Dewow ۸۳
- بهره اتوماتیک ۸۳
- شکل ۴-۱۸: مقطع عمقی داده‌های GPR بروی پروفیل ۳ ۸۴
- شکل ۴-۱۹: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف ۸۸
- بر روی پروفیل ۴ ۸۸
- شکل ۴-۲۰: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۴ ۸۸
- شکل ۴-۲۱: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر ۹۱
- روی پروفیل ۵ ۹۱
- شکل ۴-۲۲: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۵ ۹۱
- شکل ۴-۲۳: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری دوقطبی-دوقطبی به ازاء n های مختلف بر ۹۳
- روی پروفیل ۵ ۹۳
- شکل ۴-۲۴: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از ۹۳
- آرایش دو قطبی-دوقطبی برای پروفیل ۵ ۹۳
- شکل ۴-۲۵: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر ۹۶
- روی پروفیل ۶ ۹۶
- شکل ۴-۲۶: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۶ ۹۶
- شکل ۴-۲۷: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر ۹۸
- روی پروفیل ۷ ۹۸
- شکل ۴-۲۸: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۷ ۹۸
- شکل ۴-۲۹: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر ۱۰۰
- روی پروفیل ۸ ۱۰۰
- شکل ۴-۳۰: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۸ ۱۰۰
- شکل ۴-۳۱: مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون و مقطع دو بعدی ۱۰۰

بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی بر روی پروفیل ۸.....۱۰۲
شکل ۴-۳۲: پروفیل های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر

روی پروفیل ۹.....۱۰۳

شکل ۴-۳۳: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه پروفیل ۹.....۱۰۳

شکل ۴-۳۴: مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.....۱۰۶

شکل ۴-۳۵: مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.....۱۰۷

شکل ۴-۳۶: مقطع عمقی پروفیل ۶ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.....۱۰۷

شکل ۴-۳۷: مقطع عمقی پروفیل ۷ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.....۱۰۷

شکل ۴-۳۸: مقطع عمقی پروفیل ۸ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.....۱۰۸

شکل ۴-۳۹: مقطع عمقی پروفیل ۹ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.....۱۰۸

فصل پنجم: اندازه گیری بر روی لوله های مدفون

شکل ۵-۱: عکس هوایی منطقه برداشت به همراه پروفیل های برداشتی و امتداد تقریبی لوله۱۱۱

شکل ۵-۲: مقطع عمقی پروفیل صفر، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر۱۱۲

شکل ۵-۳: مقطع عمقی پروفیل ۱، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر۱۱۲

شکل ۵-۴: مقطع عمقی پروفیل ۲، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر۱۱۲

شکل ۵-۵: مقطع عمقی پروفیل ۳، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر۱۱۳

شکل ۵-۶: یک رد منفرد GPR در ایستگاه ۴/۳۵ متری از شکل ۵-۴.....۱۱۵

شکل ۵-۷: میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای لوله انتقال فرآورده های نفتی۱۱۷

شکل ۵-۸: پروفیل های مقاومت ویژه و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی لوله فلزی... ۱۱۹

شکل ۵-۹: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه لوله فلزی مدفون۱۱۹

شکل ۵-۱۰: مقطع عمقی داده های GPR در خاک های با رسانندگی الکتریکی بالا.....۱۲۱

شکل ۵-۱۱: میانگین طیف فرکانس بازگشتی برای برداشت در خاک های با رسانندگی بالا (الف)

و پروفیل صفر از بخش ۵-۱-۱ (ب).....۱۲۲

شکل ۵-۱۲: مقطع زمانی پروفیل GPR با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر.....۱۲۳

فهرست جداول

فصل دوم: GPR و پردازش و تفسیر داده‌های آن

- جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد ۱۷
- جدول ۲-۲: گذردهی نسبی محیط‌های مختلف، به همراه ضرایب بازتاب محاسبه شده برای
فصل مشترک آنها ۲۲

فصل سوم: روش‌های الکتریک

- جدول ۱-۳: مقاومت ویژه برخی از انواع آب، سنگ و رسوبات ۵۰

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

رادار نفوذی به زمین^۱ و یا به طور مختصر GPR یکی از روش‌های با قدرت تفکیک^۲ بالای ژئوفیزیک می‌باشد. در این روش از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا (۱۲/۵ تا ۲۳۰۰ مگاهرتز)^۳ برای آشکارسازی ساختارهای زیرسطحی بهره برده می‌شود [۴۳، ۴۴]. از این رو در تقسیم‌بندی‌های ژئوفیزیک، معمولاً آن را در حوزه روش-های الکترومغناطیس طبقه‌بندی می‌کنند. در صورتی که در این روش انتشار امواج الکترومغناطیس درون زمین و همچنین شیوه پردازش و تفسیر داده‌ها به لرزه‌نگاری بازتابی شباهت‌های بسیاری دارد.

دستگاه‌های GPR از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده و میل به کاربرد آن، از اواسط دهه ۱۹۹۰ به شدت رو به فزونی است. این مطلب خود تأکیدی بر گستره کاربردها و توانایی‌های این روش می‌باشد. هرچند استفاده روز افزون از این روش را می‌توان به قابلیت دسترسی به دستگاه‌های GPR از سال ۱۹۸۰ نسبت داد، ولی سهولت در برداشت داده‌ها، توانایی اکتساب اطلاعات از روی سطح و همچنین از درون گمانه‌ها، شباهت آن با لرزه‌نگاری بازتابی و قدرت تفکیک بالای این روش را می‌توان از دیگر عوامل جذاب در کاربرد آن ذکر کرد [۲۵].

گستره کاربردهای GPR بسیار وسیع بوده و مقالات و مطالعات گوناگونی در حوزه علوم زمین‌شناسی، زیست-محیطی، آب‌شناسی، مطالعه یخچال‌ها، باستان‌شناسی، فعالیت‌های عمرانی و ساختمانی و بسیاری از کاربردهای دیگر، در این خصوص دیده می‌شود [۲۰، ۲۵، ۲۶، ۲۷، ۳۷]. علی‌رغم چنین حجم از کاربردها و همچنین توانایی‌های این روش در حوزه علوم مختلف، استفاده از آن در کشورمان معمول نبوده و نیاز به کاربرد آن به شدت احساس می‌شود.

^۱ Ground penetrating radar

^۲ Resolution

^۳ فرکانس‌های ذکر شده، فرکانس مرکزی آنتن‌هایی است که توسط شرکت‌های سازنده ارائه می‌شود.

۱-۲- کاربردهای روش GPR

موفقیت روش‌های ژئوفیزیک وابسته به وجود تباین در مشخصه‌های فیزیکی بین اهداف زیرسطحی با محیط اطراف آنها می‌باشد. کمیتی که سبب می‌شود اهداف زیرسطحی توسط روش GPR قابل آشکارسازی باشند، وجود تباین بین گذردهی دی‌الکتریک این اهداف و محیط دربرگیرنده آنها است.

امواج الکترومغناطیس ساطع شده توسط دستگاه GPR در برخورد با ناپیوستگی‌های الکتریکی به واسطه تغییر در گذردهی محیط در دو طرف فصل مشترک بازتاب می‌شوند. موج بازتابیده از این فصل مشترک توسط دستگاه GPR قابل آشکارسازی است. دستگاه‌های GPR زمان رسید رویدادها را اندازه‌گیری می‌کنند، از این رو بازتاب از اهداف زیرسطحی به صورت تابعی از زمان نشان داده می‌شود. برای آنکه رویدادهای بازتابی پاسخی صحیح از عمق اهداف زیرسطحی باشند، مقادیر ثبت شده زمانی بایستی به عمق صحیح‌شان نسبت داده شوند. این تبدیل عمقی با استفاده از سرعت امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی صورت می‌پذیرد.

گستره کاربردهای GPR بسیار وسیع بوده و برای مقاصد گوناگون از قبیل تعیین ضخامت خاک و همچنین چینه‌شناسی رسوبات، تعیین سطح ایستابی، آشکارسازی حفره‌ها، کانال‌ها و تونل‌های مدفون، آشکارسازی درز و شکاف‌ها در سنگ‌های آذرین، به نقشه درآوردن مناطق آلوده در مطالعات زیست محیطی، بررسی شرایط محل ساخت سازه‌های عظیم، بررسی غیر تخریبی^۴ مصالح ساختمانی و ستون پل‌ها، آشکارسازی اجسام مدفون در بررسی‌های باستان‌شناسی، آشکارسازی تأسیسات ساختمانی نظیر کابل‌ها و لوله‌های مدفون، تعیین ضخامت یخ و لایه منجمد زمین^۵، بررسی لایه‌های آسفالت در جاده‌ها و همچنین کاربردهای گوناگون دیگر استفاده می‌گردد [۸، ۱۲، ۱۴، ۱۸، ۲۰، ۲۶]. از ویژگی‌های مثبت این روش علاوه بر قدرت تفکیک بالای آن، می‌توان به سرعت برداشت داده‌ها و همچنین خاصیت غیر تهاجمی^۶ آن اشاره کرد. در محیط‌های شهری، اغلب روش‌های ژئوفیزیک به دلیل وجود محدودیت‌های مکانی و نوفه‌های محیطی با مشکل روبرو هستند و در پاره‌ای از موارد امکان استفاده از آنها وجود ندارد. در این گونه محیط‌ها با استفاده از GPR بدون داشتن اثرات نامطلوب در محیط برداشت، داده‌ها را با سرعت بالایی می‌توان برداشت کرد.

^۴ Nondestructive

^۵ Permafrost

^۶ Noninvasive

۱-۳- مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه GPR

مطالعات کاربردی و تحقیقاتی در زمینه GPR نزدیک به ۳ دهه است که در نقاط مختلف دنیا آغاز شده و تا به امروز به طور فزاینده‌ای ادامه داشته است. تعداد مقالات و مطالعات ثبت شده در این زمینه، همچنان رو به فزونی است. "از جمله مطالعات اولیه در این زمینه می‌توان به مطالعات آنان^۷ و دیویس^۸ در زمینه خاک‌های یخ زده و منجمد به سال ۱۹۷۶ اشاره کرد" [۱۲]. از دیگر مطالعات این دو می‌توان مطالعات آنها در زمینه چینه‌شناسی رسوبات و سنگ و همچنین آشکارسازی شکستگی‌های درون سنگ‌های آذرین به سال ۱۹۸۹ را نام برد [۱۴]. مطالعه ون اور میرن^۹ در خصوص آب‌های زیرزمینی و آشکارسازی سطح ایستابی به سال ۱۹۹۴ از مطالعات موفق GPR در زمینه آب‌های زیرزمینی است [۳۷]. در این مطالعه با استفاده از آنتن‌های با فرکانس مرکزی مختلف سطح ایستابی و سفره‌های معلق آب‌های زیرزمینی آشکارسازی شده و پاسخ‌های متفاوت آنها با یکدیگر مقایسه شده است. از نتایج این مطالعه می‌توان به آشکارسازی بهتر سطح ایستابی در فرکانس‌های پایین اشاره کرد. در استفاده از فرکانس‌های پایین هرچند عمق نفوذ افزایش یافته ولی قدرت تفکیک قائم نیز کاهش یافته است. علاوه بر این GPR حتی در آشکارسازی ناپیوستگی‌های سطح ایستابی نیز موفق عمل کرده است. مطالعه نایت^{۱۰} در خصوص کاربردهای GPR در آلودگی‌های زیرسطحی ناشی از آلودگی‌های هیدروکربوری و آشکارسازی نحوه انتشار این آلودگی‌ها در شرایط آزمایشگاهی به سال ۲۰۰۱ از جمله مطالعات GPR در زمینه مطالعات زیست محیطی است [۲۰]. تفسیر کمی داده‌های GPR در این‌گونه مطالعات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه به تعیین ویژگی‌های آب شناسی نظیر تخلخل، تراوایی و محتوای آب^{۱۱} از روی گذردهی دی الکتریک محیط‌های زیرسطحی با استفاده از روابط تجربی موجود و در شرایط آزمایشگاهی، پرداخته شده است. مطالعات آزمایشگاهی کافمن^{۱۲} و همکاران با استفاده از مشخصه‌های امواج GPR در حفرات زیرسطحی به سال ۲۰۰۶ از مطالعات اخیر در آشکارسازی حفرات زیرسطحی است [۲۱]. در این مطالعه، حفرات با ابعاد مختلف و با استفاده از آنتن‌های با فرکانس مرکزی مختلف آشکارسازی شده‌اند. پدیده بازآوایش زمانی که ابعاد حفرات زیرسطحی در مقایسه با طول موج فرکانس مرکزی آنتن در هوا قابل توجه باشد، به

⁷ Annan

⁸ Davis

⁹ van Overmeeren

¹⁰ Knight

¹¹ Water content

¹² Kofman

صورت بارزی در مقاطع GPR مشاهده می‌شود [۲۱]. از محدود مطالعات GPR به همراه مقاومت ویژه می‌توان به مطالعه کومز-اورتیز^{۱۳} و همکاران در کاربرد دو روش مقاومت ویژه و GPR در آشکارسازی مواد و ساختارهای آتشفشانی به سال ۲۰۰۷ اشاره کرد [۱۸]. آنها دریافتند که مرز بین ساختارهای آتشفشانی و ساختارهایی نظیر گسل‌ها توسط روش مقاومت ویژه و ساختارهای درون نهشته‌های آتشفشانی توسط روش GPR بهتر آشکارسازی می‌شود.

از آنجا که پردازش داده‌های GPR از اهمیت بالایی برخوردار است، مطالعات بسیاری در این زمینه دیده می‌شود. از اولین مطالعات در این زمینه می‌توان به مقاله فیشر^{۱۴} و همکاران به سال ۱۹۹۲ در زمینه مهاجرت داده‌های GPR با استفاده از الگوریتم مهاجرت لرزه‌ای، اشاره کرد [۱۵]. در این مطالعه از مهاجرت معکوس-زمان^{۱۵} برای مهاجرت داده‌های GPR در محیط‌های رودخانه‌ای و همچنین چینه‌شناسی رسوبات استفاده شده است. مقاطع حاصل از پردازش مهاجرت در اینگونه محیط‌ها به ویژه زمانی که شیب بازتاب کننده‌ها زیاد باشد و یا ساختارهای زیرسطحی به صورت ناگهانی تغییر کنند و پدیده پراش^{۱۶} برجسته گردد، بسیار مؤثر است و پتانسیل تفسیر غلط را کاهش می‌دهد. البته در شرایطی که بازتاب کننده‌ها افقی باشند، پردازش مهاجرت تأثیرات مثبتی نخواهد داشت. همچنین مطالعه سان^{۱۷} و یونگ^{۱۸} در خصوص تشخیص بازتاب‌های ناشی از توده‌های روی سطح زمین در مقاطع GPR به سال ۱۹۹۵ از این دست مطالعات است [۳۴]. از آنجا که امواج GPR به راحتی می‌توانند در هوا منتشر شوند، توده‌های روی سطح زمین نظیر درختان، تخته سنگ‌های بزرگ، خطوط انتقال برق و غیره تأثیرات نامطلوبی بر مقاطع GPR خواهند گذاشت و تا حد امکان باید از آنها پرهیز کرد تا تأثیرات نامطلوب آنها بر روی مقاطع GPR مشاهده نگردد. مطالعه زیا^{۱۹} و همکاران در خصوص افزایش قدرت تفکیک در سنگ‌های آهکی با استفاده از واپیچش معین^{۲۰} داده‌ها به سال ۲۰۰۳ نیز در زمینه پردازش داده‌ها است [۳۸]. در این مطالعه با ثبت شکل دقیق پالس GPR و با استفاده از این نوع واپیچش، قدرت تفکیک به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. محیط‌های آهکی به دلیل اینکه امواج GPR بدون اتلاف و میرایی قابل توجه می‌توانند در آنها انتشار یابند، استفاده از این نوع واپیچش را ساده و ممکن می‌سازد.

¹³ Gómez-Ortiz

¹⁴ Fisher

¹⁵ Reverse-time

¹⁶ Diffraction

¹⁷ Sun

¹⁸ Young

¹⁹ Xia

²⁰ Deterministic deconvolution

از محدود مطالعات انجام شده در کشور ما می توان به آشکارسازی شکستگی ها و تاقیدیس های نزدیک سطح در منطقه سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه به سال ۱۳۸۶ اشاره کرد [۲]. در این مطالعه روش GPR با استفاده از آنتن با فرکانس مرکزی ۱۰۰ مگاهرتز در آشکارسازی شکستگی ها و تاقیدیس های سطحی موفق عمل کرده است. آشکارسازی این شکستگی برای بدست آوردن یک مدل آب زیرزمینی در این منطقه از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. همچنین از دیگر مطالعات در این خصوص، می توان به مطالعات GPR در کنار روش مغناطیس سنجی برای آشکارسازی طاق های باستانی مدفون در خاک های نزدیک سطح به سال ۱۳۸۴ در شهر قصر شیرین، اشاره کرد [۱]. از آنجا که این هدف در عمق کمی واقع بوده است، هر دو روش GPR و مغناطیس سنجی در آشکارسازی آن موفق عمل کرده اند. در این مطالعه قابلیت روش رادار در آشکارسازی طاق های سطحی نشان داده شده است.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

علی رغم مزایا و توانایی های روش GPR در مطالعات کم عمق و سطحی و کاربردهای این روش توانمند در حوزه علوم مختلف، استفاده و کاربری از این روش در کشورمان مرسوم نبوده و توانایی های آن برای متخصصین ناشناخته است. برای معرفی این روش و مقایسه آن با دیگر روش های معمول ژئوفیزیک و نشان دادن مزایا و معایب آن در مقایسه با دیگر روش های ژئوفیزیک بایستی هدفی مناسب انتخاب گردد. انتخاب این هدف از آنجا حائز اهمیت است که اولاً توسط روش های مزبور قابل آشکارسازی بوده و ثانیاً اطلاعات نسبی از هدف در اختیار باشد که بتوان نتایج را با یکدیگر مقایسه کرد. از آنجا که آب دارای گذردهی دی الکتریک^{۲۱} متفاوتی در مقایسه با سنگ ها و رسوبات لایه های فوقانی زمین است، هدفی بسیار مناسب برای آشکارسازی توسط روش GPR می باشد. از طرف دیگر روش مقاومت ویژه به دلیل تباین^{۲۲} خوب در مقاومت ویژه آب با رسوبات اطراف یکی از روش های معمول و موفق در اکتشاف آب های زیرزمینی است. از این رو مقایسه این دو روش در بررسی و اکتشاف آب های زیرزمینی، عمق نفوذ و به خصوص مقایسه قدرت تفکیک آن ها، ضروری به نظر

²¹ Dielectric permittivity

²² Contrast

می‌رسد. از دیگر اهداف مناسب به منظور انجام این مقایسه، لوله‌های فلزی مدفون در خاک می‌باشند. این اهداف نیز به خوبی توسط روش‌های مزبور قابل آشکارسازی هستند.

۱-۵- هدف از انجام مطالعه حاضر

از اهداف اصلی پایان نامه حاضر می‌توان به کاربرد GPR همراه با پردازش و تفسیر داده‌های آن به عنوان یکی از روش‌های با قدرت تفکیک بالا در آشکارسازی اهداف نزدیک سطح (قنات آب و لوله‌های مدفون در زیرسطح زمین) اشاره کرد. با انجام برداشت‌های مختلف سعی شده است که موفقیت و عدم موفقیت روش GPR در محیط‌های مختلف نشان داده شود.

همچنین در این پایان نامه سعی شده است مزایا و معایب این روش در مقایسه با روش مقاومت ویژه نشان داده شود و این دو روش از لحاظ قدرت تفکیک، عمق نفوذ، سرعت برداشت داده‌ها و مقدار اطلاعات بدست آمده با یکدیگر مقایسه شوند. در نهایت با تعمیم در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیک به عنوان روشی ویژه با قدرت تفکیک بالا در برداشت‌های نزدیک سطح به جای دیگر روش‌های معمول ژئوفیزیک، معرفی گردد. از دیگر اهداف پایان نامه حاضر می‌توان به نشان دادن قابلیت این روش در محیط‌های شهری اشاره کرد. محیط‌هایی که کاربرد اغلب روش‌های ژئوفیزیک به دلیل محدودیت‌های مکانی و نوفه^{۲۳}‌های محیطی در آنها با مشکلاتی همراه و بعضاً غیر ممکن است.

۱-۶- ساختار پایان نامه

پایان نامه حاضر از ۶ فصل مجزا تشکیل یافته است. در فصل اول مقدمه‌ای در خصوص پایان نامه، ضرورت و همچنین هدف از انجام این مطالعه آورده شده است. در فصل دوم این پایان نامه با معرفی روش GPR، تئوری انتشار امواج آن و همچنین ویژگی‌های الکترومغناطیس مواد، به اصول و روش‌های پردازش داده‌های GPR که از اهمیت بالایی برخوردارند، پرداخته شده است. در فصل سوم مختصری در خصوص روش‌های الکتریک با

²³ Noise

تکیه بر روش مقاومت ویژه آورده شده است. در ادامه این فصل، روش مقاومت ویژه در بررسی ساختارهای زمین‌شناسی مورد بحث قرار گرفته است.

در فصل چهارم با توضیح انجام عملیات صحرایی و اندازه‌گیری داده‌ها، به اندازه‌گیری، پردازش و تفسیر داده‌های GPR و مقاومت ویژه بر روی قنات آب و همچنین مقایسه نتایج حاصل پرداخته‌ایم. در فصل پنجم اندازه‌گیری داده‌های GPR و مقاومت ویژه بر روی لوله‌های مدفون در زیر سطح زمین آورده شده است. ضمن پردازش و تفسیر داده‌ها در این فصل، داده‌های GPR به صورت سه بعدی نیز نمایش داده شده‌اند. در این فصل سعی شده که تأثیر رسانندگی محیط برداشت بر روی اندازه‌گیری‌های GPR به صورت مفصل بحث شود. در ادامه با در نظر گرفتن یک پروفیل GPR بر روی لوله‌های تأسیساتی، قابلیت این روش در به نقشه درآوردن این‌گونه ساختارها، مورد تأکید قرار گرفته است. در فصول چهارم و پنجم این پایان‌نامه سعی شده است که شیوه‌های پردازش و تفسیر داده‌های GPR در هر پروفیل به صورتی متفاوت انجام شود تا از تکرار مجدد مطالب خودداری شود.

در فصل ششم که فصل انتهایی این پایان‌نامه است، ضمن ارائه یک جمع‌بندی، نتایج حاصل از این مطالعه به همراه پیشنهاداتی برای مطالعات آتی به صورت فهرست‌وار آورده شده است.

فصل دوم

GPR و پردازش و تفسیر داده‌های آن

ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیرسطحی، برای اولین بار به مطالب و اختراعات ثبت شده آلمان به سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر^{۲۴} بازمی‌گردد [۲۶]. تا قبل از اختراع رادار به نظر نمی‌رسید که مطالبی از این دست، باعث به‌وجود آمدن سیستم‌های قابل استفاده جهت بررسی‌های زیرسطحی توسط امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا شوند. کلمه رادار^{۲۵} که مخفف عبارت 'Radio Detection And Ranging' می‌باشد، سیستمی است که از پالس‌های کوتاه الکترومغناطیس بهره می‌برد. کشور بریتانیا از این سیستم در دوران جنگ جهانی دوم استفاده می‌کرده و چندین نوع از این گونه سیستم‌ها قبل از جنگ جهانی دوم در بریتانیا، فرانسه، آلمان و ایالات متحده موجود بوده‌اند. گذشته از کاربردهای فوق‌العاده آن در فعالیت‌های نظامی و غیرنظامی هم‌اکنون رادار یک ابزار قدرتمند در بررسی‌های زیرسطحی می‌باشد.

رادار با امواج پالسی شکل (پالس‌رادار^{۲۷}) یکی از انواع مختلف رادار می‌باشد. دستگاه‌های مختلف پالس‌رادار که برای بررسی‌های زیرسطحی به کار می‌روند، مجموعاً تحت عنوان "رادار نفوذی به زمین" و یا به صورت مخفف GPR، نامگذاری شده‌اند. توسعه این ابزارها از حوالی سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه آن سرعت قابل توجهی یافت که خود ناشی از پیشرفت فوق‌العاده در تکنولوژی الکترونیک و کامپیوتر بعد از سال ۱۹۶۰ می‌باشد [۲۶].

در برخی از نوشته‌ها از GPR با نام‌های دیگری همچون Georadar, subsurface radar, Ground-probing radar و یا Impulse radar یاد شده است. دستگاه‌های GPR از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده و همانطور که در شکل ۱-۲ دیده می‌شود میل به کاربرد آن، از اواسط دهه ۱۹۹۰ به شدت رو به فزونی است. این مطلب خود تأکیدی بر گستره کاربردها و توانایی‌های این روش می‌باشد. هرچند استفاده روز افزون از این روش را می‌توان به قابلیت دسترسی به دستگاه‌های GPR، از دهه ۱۹۸۰ نسبت داد، ولی سهولت در برداشت

²⁴ Hulsmeyer

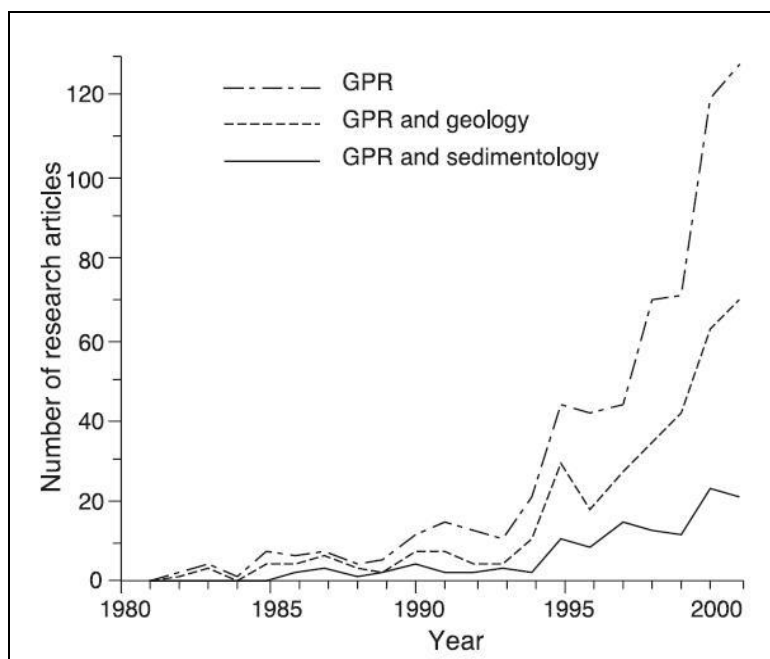
²⁵ Radar

²⁶ Pulse

²⁷ Pulseradar

داده‌ها، توانایی اکتساب اطلاعات از روی سطح و همچنین از درون گمانه‌ها، شباهت آن با لرزه نگاری بازتابی و قدرت تفکیک^{۲۸} بالای آن را می‌توان از دیگر عوامل در گسترش کاربردهای این روش دانست.

قبل از کاربرد GPR معمولترین روش‌ها در بررسی‌های کم‌عمق و سطحی، لرزه‌نگاری بازتابی و انعکاسی بوده‌اند [۲۵]. نیاز به قدرت تفکیک بالاتر در برخی از بررسی‌ها توجه به دیگر روش‌های ژئوفیزیک که دارای قدرت تفکیک بالاتری نسبت به روش‌های لرزه‌ای بوده‌اند را افزایش داد. یکی از روش‌های موفق در این زمینه، GPR بوده که با استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا ناپیوستگی‌های الکتریکی را در اعماق کم با قدرت تفکیک بالایی آشکارسازی می‌کند. علی‌رغم قابلیت‌های بالای این روش از معایب آن می‌توان به عمق نفوذ محدود آن اشاره کرد. به همین جهت از GPR در بررسی‌های نزدیک سطح (عموماً کمتر از ۵۰ متر) استفاده می‌شود [۲۵].



شکل ۲-۱: تعداد مقاله‌های چاپ شده با موضوع GPR، استفاده از GPR در زمین‌شناسی و نیز کاربرد GPR در رسوب‌شناسی بین سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ [۲۵].

۲-۱- اصول و تئوری روش GPR

۲-۱-۱- دستگاه GPR

اجزاء دستگاه GPR در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. دستگاه GPR از یک مولد سیگنال، یک فرستنده (T_x) و یک گیرنده (R_x) تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۲-۲ دیده می شود، گیرنده ممکن است توانایی ذخیره و رقمی کردن^{۲۹} داده ها، به همراه پردازش و نمایش آنها را داشته باشد. بعضی سیستم های پیشرفته GPR دارای یک کامپیوتر همراه می باشند که پردازش داده ها به هنگام برداشت و بعد از آن را ممکن می سازد. دستگاه های GPR در دو شیوه تک آنتن^{۳۰} و دو آنتن^{۳۱} بکار می روند [۲۷]. در مورد اول از یک آنتن و در مورد دوم از دو آنتن مجزا برای ارسال و دریافت امواج استفاده می شود.

برداشت های GPR هم از طریق پروفیل زنی پیوسته و هم از طریق برداشت در نقاط ثابت انجام می پذیرد. در پروفیل زنی پیوسته^{۳۲} آنتن ها روی زمین در روی پروفیل مورد نظر با سرعت ثابت کشیده می شوند و در مواقعی که سرعت بیشتری برای اکتساب داده ها مورد نیاز است، آنتن ها در عقب یک وسیله نقلیه یدک می شوند.

زمانی که پالس الکترومغناطیس ساطع شده از آنتن فرستنده به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور کرده و بخشی بازتاب می شود. این امر ناشی از تغییر امپدانس^{۳۳} امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک دو محیط می باشد [۲۶]. مقدار انرژی بازتابی و عبوری و همچنین مقدار انرژی اتلافی بستگی به خواص الکتریکی مواد در دو طرف فصل مشترک دارد که در ادامه به صورت مفصل بحث می شوند. اگر زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیس که از آنتن فرستنده ساطع و بعد از انعکاس از اهداف زیرسطحی به آنتن گیرنده باز می گردد را اندازه گیری کنیم، می توان عمق هدف مورد نظر را تعیین کرد. این امر در صورتی امکان پذیر است که سرعت پالس (موج الکترومغناطیس) در محیط مشخص باشد.

زمان رفت و برگشت موج از آنتن فرستنده و بازتاب از اهداف زیرسطحی و دریافت در گیرنده، از چند ده تا چندین هزار نانو ثانیه متغیر است. برای ثبت چنین زمان هایی به دستگاه هایی با دقت بسیار بالا احتیاج داریم.

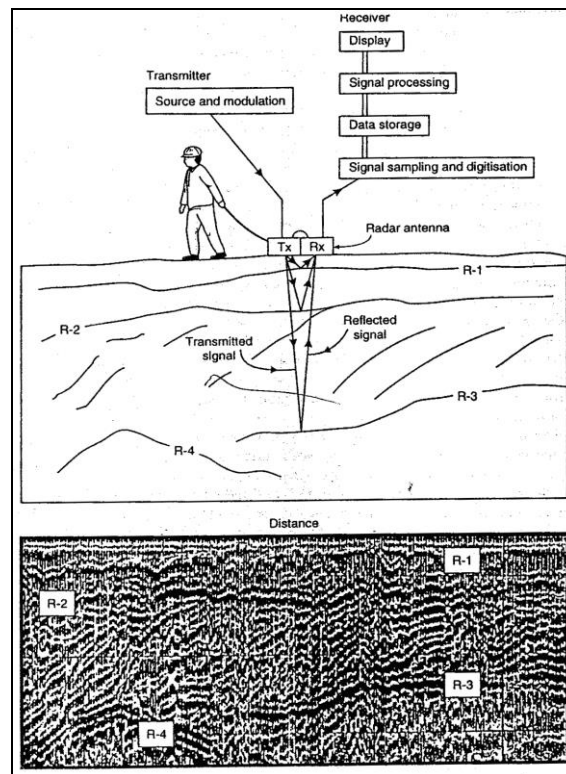
²⁹ Digitization

³⁰ Monostatic

³¹ Bistatic

³² Continuous profiling

³³ Impedance



شکل ۲-۲: اجزاء تشکیل دهنده سیستم GPR. به همراه مقطع زمانی و مقطع تفسیر شده آن [۲۷].

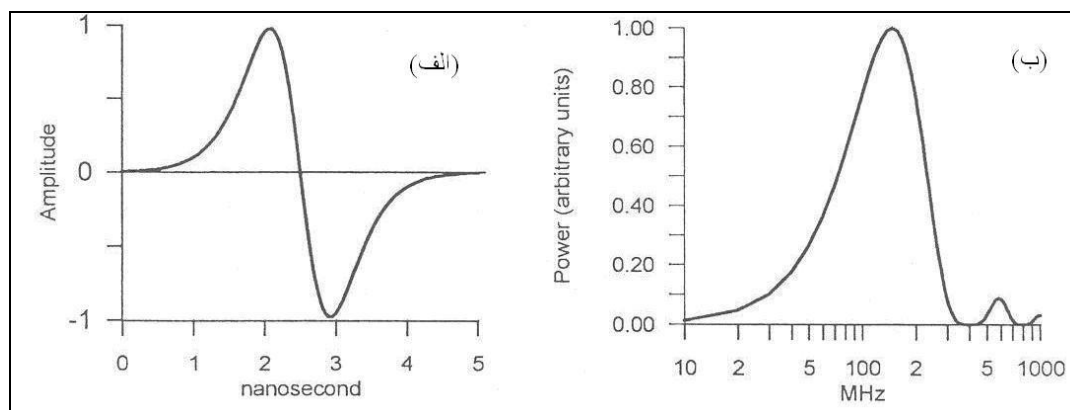
بیشتر سیستم‌های GPR از دو آنتن برای ارسال و دریافت امواج استفاده می‌کنند. ساده‌ترین آنتن‌ها، دوقطبی - های الکتریکی بوده که از یک میله فلزی به قطر چند میلی‌متر تا ۲ سانتیمتر، ساخته شده‌اند. معمولاً این میله‌ها از جنس آلومینیوم بوده و دارای روکشی از جنس نیکل می‌باشند. طول آنتن به مشخصات پالس فرستنده، و از همه مهم‌تر به دوره یا پهنای پالس^{۳۴} وابسته است. آنتن‌هایی به طول ۰/۹ تا ۱/۲ متر برای ساطع کردن پالس‌هایی با پهنای بین ۸ تا ۱۲ نانو ثانیه، و آنتن‌هایی با طول ۰/۱۵ تا ۰/۴ متر برای تولید پالس‌هایی با پهنای تقریبی ۱ تا ۲ نانو ثانیه استفاده می‌شوند. در پهنای پالس ۱ تا ۱۰۰۰ نانو ثانیه طول آنتن مستقیماً با پهنای پالس متناسب است. از این‌رو هرچه پالس مورد نظر دارای پهنای بیشتری باشد بایستی طول آنتن به کاررفته بزرگتر باشد.

در عمل آنتن‌های GPR تنها یک پالس منفرد ساطع نمی‌کنند، بلکه آنها یک رشته پالس از یک پالس مشخص را در فواصل زمانی معین ساطع می‌کنند. معمولاً این فاصله زمانی بین ۲ تا ۵۰ میکرو ثانیه می‌باشد و به عکس زمان بین دو پالس متوالی، فرکانس تکرار^{۳۵} می‌گویند. شکل ۲-۳ یک پالس منفرد GPR را نشان می‌دهد که

^{۳۴} Pulse width

^{۳۵} Repetition frequency

پهنای آن ۵ نانو ثانیه می‌باشد. چنین پالسی متشکل از تعدادی امواج سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌ها و فازهای مختلف است و مربع دامنه در هر فرکانس متناسب با انرژی ساطع شده در آن فرکانس می‌باشد. فرکانسی که بیشترین تمرکز انرژی در آن واقع است فرکانس مرکزی نامیده می‌شود [۲۷]. فرکانس مرکزی برای پالس شکل زیر در حدود ۱۲۰ مگاهرتز می‌باشد (شکل ۲-۳-ب).



شکل ۲-۳: یک پالس منفرد GPR (الف) به همراه طیف فرکانس آن (ب) [۲۶].

در فاصله زمانی بین دو پالس متوالی، گیرنده، میدان الکتریکی پالس‌های ورودی را به صورت آنالوگ^{۳۶} (پیوسته) اندازه‌گیری می‌کند. این سیگنال در گیرنده تقویت شده و سپس به صورت رقومی در حافظه کامپیوتر ذخیره می‌شود تا پردازش‌های بعدی روی آنها صورت گیرد. برای این منظور سیگنال دریافتی در گیرنده نمونه‌گیری می‌شود. فواصل زمانی که سیگنال در آن نمونه‌گیری می‌شود را فاصله نمونه‌گیری^{۳۷} و معکوس این فاصله زمانی را فرکانس نمونه‌گیری می‌نامند.

مدت زمانی که رویدادها بین دو پالس متوالی ارسالی ثبت می‌شوند، پنجره زمانی^{۳۸} نام دارد [۱۲، ۲۶]. طول پنجره زمانی برابر زمان رفت و برگشت سیگنال تا عمق حداکثر بوده و در تمامی دستگاه‌های تجاری موجود، قابل تنظیم می‌باشد [۳۰، ۱۲]. هر بازتاب پالسی را باز می‌گرداند که تحت شرایط ایده‌آل، شکل و دوره یکسانی با پالس فرستنده دارد ولی دامنه آن متفاوت بوده و مانند پالس فرستنده متشکل از چندین فرکانس می‌باشد.

³⁶ Analog

³⁷ Sampling interval

³⁸ Time window

اگر v_s فرکانس نمونه‌گیری و v_{max} بزرگترین فرکانس موجود در سیگنال باشد، v_s باید بزرگتر از $2v_{max}$ باشد. در چنین شرایطی نمونه‌گیری به درستی انجام شده و در شکل سیگنال ثبت شده آلیازینگ^{۳۹} رخ نمی‌دهد و بدین ترتیب شکل سیگنال ورودی به درستی ثبت خواهد شد.^{۴۰}

مقادیر رقمی ثبت شده دوباره به سیگنال‌های آنالوگ تبدیل شده و به صورت ولتاژ سیگنال در مقابل زمان پیمایش (زمان رفت و برگشت)^{۴۱} پالس رسم می‌شوند. محور عمودی، زمان رفت و برگشت پالس و محور افقی، شدت سیگنال را نشان می‌دهد. یک راه نمایش داده‌ها، نمایش شدت به صورت ردهای جنبان^{۴۲} می‌باشد. به این ترتیب که درون هر قسمت از این ردها که بالاتر از حد زمینه واقع شده، سیاه می‌شود تا رویدادها قابل تشخیص باشند. اسکن‌های متوالی در نقاط مختلف پروفیل در کنار یکدیگر قرار داده می‌شوند. حاصل این اثر یک نمایش سطحی متغیر^{۴۳} و یا به صورت خلاصه VAR دو بعدی، همانند پروفیل‌هایی که در لرزه‌نگاری با آن مواجهیم، می‌باشد.

۲-۱-۲- انتشار امواج GPR در زمین

پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را تعیین می‌کنند عبارتند از [۲۵]:

(۱) گذردهی دی‌الکتریک^{۴۴} (ϵ)

(۲) رسانندگی الکتریکی^{۴۵} (σ)

(۳) تراوایی مغناطیس^{۴۶} (μ)

زمانی که یک میدان متناوب الکتریکی به ماده‌ای اعمال می‌شود، بارهای الکتریکی محصور در آن ماده به آزادی نمی‌توانند جابه‌جا شوند و به آن میدان متناوب با جابه‌جایی‌های کوچکی پاسخ می‌دهند و اصطلاحاً پلاریزه می‌شوند. پاسخ یون‌ها، الکترون‌ها و مولکول‌های دوقطبی به این میدان‌ها متفاوت می‌باشد.^{۴۷}

³⁹ Aliasing

² برای مطالعه بیشتر به مرجع شماره ۳ در فهرست منابع مراجعه شود.

⁴¹ Two-Way travel time

⁴² Wiggle trace

⁴³ Variable-area-display

⁴⁴ Dielectric permittivity

⁴⁵ Electric conductivity

⁴⁶ Magnetic permeability

^{۴۷} برای مطالعه بیشتر به مرجع ۲۵ مراجعه کنید.

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه بعدی به سمت پایین حرکت می‌کند، و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \frac{1 + \sqrt{1 + (\sigma / \epsilon \omega)}}{2}}} \quad (1-2)$$

در رابطه بالا C_0 سرعت موج الکترومغناطیس در هوا، μ_r نشان دهنده تراوایی مغناطیس نسبی و ϵ_r گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا و ω فرکانس زاویه‌ای موج GPR می‌باشند. عبارت $\sigma / \epsilon \omega$ که به فاکتور اتلاف^{۴۸} معروف است، در محیط‌های کم‌اتلاف مانند شن و ماسه‌های خالص نزدیک به صفر بوده و قابل صرف نظر می‌باشد (جدول ۱-۲). همچنین اثر μ_r در محیط‌های غیرمغناطیس و در محدوده فرکانس‌های GPR کوچک بوده و می‌توان آن را مطابق با محیط‌های غیر مغناطیس برابر ۱ در نظر گرفت. به این ترتیب رابطه (۱-۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود [۲۶، ۲۷، ۳۷]:

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

در استفاده از رابطه بالا باید این نکته را مد نظر قرار داد که در برخورد با مواد با رسانندگی بالا نظیر آب دریا و برخی از انواع رس‌ها و یا در برخورد با مواد مغناطیسی نظیر مگنتیت و هماتیت این رابطه صحیح نمی‌باشد [۱۲]. ولی خوشبختانه در اکثر کاربردهای GPR با تقریب خوبی می‌توان از این رابطه استفاده کرد.

مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد تشکیل دهنده و همچنین میزان آب موجود در آنها بستگی دارد و هر کدام از این پارامترها دارای تأثیر به‌سزایی بر روی سرعت و اتلاف امواج GPR می‌باشند. برخی از مواد مانند یخ‌های قطبی، نسبت به امواج GPR شفاف بوده و این امواج بدون اتلاف زیاد می‌توانند از آن عبور کنند. لازم به توضیح است که فعالیت‌های اولیه در زمینه GPR در چنین محیط‌هایی صورت گرفته است [۱۲]. برخی دیگر از مواد مانند رس‌های اشباع از آب و همچنین آب دریا نسبت به این امواج کدر بوده و این امواج را بازتاب

⁴⁸ Loss factor

و یا جذب می کنند [۲۷]. از این رو امواج GPR در فواصل کوتاهی تلف (میرا) می شوند و نمی توانند در اینگونه محیطها انتشار یابند (جدول ۱-۲).

جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد [۲۹].

اتلاف (dB / M)	سرعت (M / nS)	رسانندگی (mS / M)	گذردهی نسبی (ϵ_r)	مواد معمول
۰	۰/۳۰	۰	۱	هوا
2×10^{-2}	۰/۰۳۳	۰/۰۱	۸۰	آب مقطر
۰/۱	۰/۰۳۳	۰/۵	۸۰	آب شیرین
10^{-2}	۰/۰۱	3×10^{-2}	۸۰	آب دریا
۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱	۳-۵	ماسه خشک
۰/۰۳-۰/۳	۰/۰۶	۰/۱-۱	۲۰-۳۰	ماسه اشباع
۰/۴-۱	۰/۱۲	۰/۵-۲	۴-۸	سنگ آهک
۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰	۵-۱۵	شیل
۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰	۵-۳۰	لای ها
۱-۳۰۰	۰/۰۶	۲-۱۰۰۰	۵-۴۰	رس ها
۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱	۴-۶	گرانیت
۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱	۵-۶	نمک خشک
۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱	۳-۴	یخ

هنگامی که امواج GPR در محیطهای زیرسطحی انتشار می یابند عواملی در کاهش قدرت سیگنال این امواج تأثیر گذارند. از جمله این عوامل می توان به پراکندگی آنها در اثر برخورد با اشیاء در اندازه طول موج GPR، انعکاس و عبور از هر فصل مشترک، اتلاف انرژی به صورت گرما و پخش هندسی امواج اشاره کرد. اما مسبب

اصلی کاهش انرژی سیگنال، میرایی یا تضعیف (اتلاف)^{۴۹} بوده که خود تابعی از مشخصات الکتریک و دی-الکتریک محیط انتشار موج می‌باشد. اتلاف را با α نمایش داده و مقدار آن برابر $\frac{1}{\delta}$ می‌باشد. در این رابطه δ عمق پوست یا پوسته^{۵۰} می‌باشد. به عنوان مثال عمق پوسته برای آب دریا تنها ۱ سانتیمتر و برای رس مرطوب تنها ۰/۳ متر می‌باشد. اتلاف توسط رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۷، ۲۵]:

$$(\alpha - \beta) = \omega \left\{ \left(\frac{\mu \epsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{1/2} \Rightarrow \delta = \frac{1}{\omega} \left\{ \left(\frac{\mu \epsilon}{2} \right) \left[\left(1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2} \right)^{1/2} - 1 \right] \right\}^{-1/2}$$

که در رابطه بالا μ تراوایی مغناطیس، ϵ گذردهی دی‌الکتریک، σ رسانندگی و ω فرکانس زاویه‌ای موج می‌باشند.

از رابطه بالا دیده می‌شود که اتلاف مستقیماً به فرکانس وابسته است. و همان‌طور که دیده می‌شود گذردهی نسبی و رسانندگی محیط روی آن تأثیر گذارند. لازم به ذکر است که در اغلب شرایط زمین‌شناسی و با در نظر گرفتن شرایطی که منجر به بدست آوردن رابطه (۲-۲) شد، رسانندگی دارای بیشترین تأثیر بر اتلاف امواج GPR می‌باشد [۲۵]. در مناطقی که سازندها اشباع می‌باشند، رسانندگی و گذردهی نسبی بالای مایع داخل سازند، اتلاف را به طور چشم‌گیری افزایش می‌دهد. وجود رس در سازند، به دلیل وجود آب در ساختار شبکه‌ای آن نیز چنین تأثیری بر اتلاف دارد [۲۷]. لازم به توضیح است که آب شیرین از مواد کم اتلاف بوده و وجود یون‌های محلول در قسمت اشباع سازند و به واسطه آن افزایش رسانندگی محیط، اتلاف امواج GPR را سبب می‌گردد.

⁴⁹ Attenuation
⁵⁰ Skin depth

۲-۱-۳- بازتاب و عبور

همان‌طور که ذکر شد قسمتی از موج الکترومغناطیس در برخورد با فصل مشترک دو محیط با امپدانس‌های الکترومغناطیس متفاوت، عبور کرده و قسمت دیگر بازتاب می‌یابد. انرژی عبوری ممکن است توسط فصل مشترک‌های دیگر در زیر این لایه بازتاب شود. امپدانس Z در هر محیط توسط رابطه زیر بیان می‌شود [۲۶]:

$$Z = \frac{\omega\mu}{\kappa} \quad (۴-۲)$$

که در رابطه بالا κ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa = (\omega^2 \varepsilon \mu + i\omega\mu\sigma)^{1/2} \quad (۵-۲)$$

در رابطه بالا، $i = \sqrt{-1}$ بوده و از آنجا که Z تابعی از κ است و κ یک کمیت مختلط است، Z نیز یک کمیت مختلط می‌باشد.

اگر برخورد موج به فصل مشترک دو محیط به صورت عمودی باشد، ضرایب بازتاب (R) و عبور (T) به ترتیب توسط رابطه زیر بیان می‌شوند [۲۶]:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (۶-۲)$$

$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (۷-۲)$$

برخورد عمودی که در بالا مطرح شد، نشان دهنده استفاده از یک آنتن به عنوان فرستنده و گیرنده می‌باشد و در صورتی که از دو آنتن مجزا برای ارسال و دریافت امواج استفاده شود، فاصله آنتن‌ها نسبت به هم کوچکتر از فاصله بازتاب کننده (فصل مشترک دو محیط) تا آنتن‌ها باشد.

اگر محیط غیر مغناطیسی باشد با فرض اینکه: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ ، ضریب بازتاب توسط رابطه زیر بیان می‌شود:

$$R = \frac{(\omega\epsilon_1 + i\sigma_1)^{1/2} - (\omega\epsilon_2 + i\sigma_2)^{1/2}}{(\omega\epsilon_1 + i\sigma_1)^{1/2} + (\omega\epsilon_2 + i\sigma_2)^{1/2}} \quad (۸-۲)$$

که در این رابطه ϵ گذردهی مطلق محیط می باشد. برای ساده کردن رابطه بالا شرایط را محدودتر می کنیم و با در نظر گرفتن $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ یعنی دو محیط غیر رسانا، و با قرار دادن $\epsilon_i = \epsilon_{ir}\epsilon_0$ خواهیم داشت [۱۲، ۲۶]:

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{1r}} - \sqrt{\epsilon_{2r}}}{\sqrt{\epsilon_{1r}} + \sqrt{\epsilon_{2r}}} \quad (۹-۲)$$

در این رابطه ϵ_{1r} و ϵ_{2r} به ترتیب گذردهی نسبی محیط های ۱ و ۲ نسبت به گذردهی مطلق هوا (ϵ_0) می باشند.

صرف نظر از توده های فلزی، توده های غیر معمول گرافیتی و سولفیدی با رسانندگی بالا، مواد مغناطیسی نظیر مگنتیت و هماتیت، خاک های اشباع از آب، فصل مشترک آب شور و مواردی نظیر این، رابطه (۹-۲) با دقت نسبتاً خوبی ضریب بازتاب را نشان می دهد.

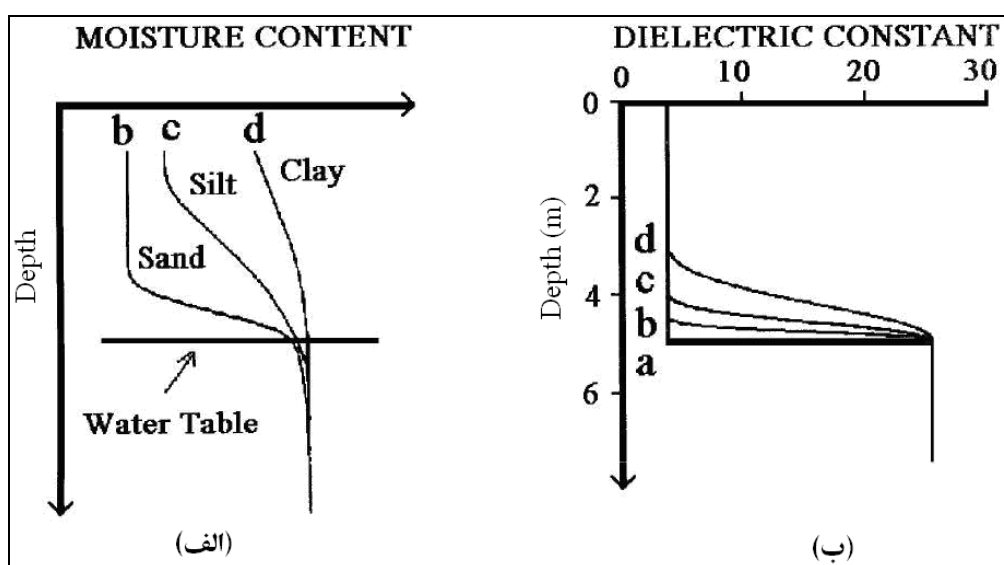
سنگ های خشک معمولاً دارای گذردهی نسبی در حدود ۵ تا ۷ می باشد [۲۶]. رطوبت مقدار گذردهی نسبی را افزایش می دهد و اگر آب در خلل و فرج و شکستگی های سنگ به مقدار قابل توجهی موجود باشد، گذردهی نسبی به مقدار نسبتاً بالایی خواهد رسید. در سنگ های رسوبی، زیر سطح ایستابی ممکن است گذردهی نسبی به مقدار ۲۵ نیز برسد. اما رسانندگی معمولاً زیاد تحت تأثیر قرار نگرفته و در رابطه (۸-۲)، هنوز $\langle\omega\epsilon_2\rangle\sigma_2$ بوده و بازهم می توانیم از آن صرف نظر کنیم. از رابطه (۹-۲) ضریب بازتاب در سطح ایستابی در حدود ۰/۳۳- به دست می آید که مقدار نسبتاً بالایی است و نشان می دهد که در اکتشاف سطح ایستابی، GPR یک روش بسیار قدرتمند می باشد. علامت منفی موجود در ضریب بازتاب سطح ایستابی به علت عبور موج از محیط با امپدانس الکترومغناطیس بالا به محیط با امپدانس الکترومغناطیس پایین می باشد.

همان طور که از رابطه (۹-۲) دیده می شود، بازتاب امواج به سبب تغییر در گذردهی نسبی در فصل مشترک دو محیط باعث آشکارسازی فصل مشترک مزبور خواهد شد. تغییر در نوع مایع محتوی سازند، تغییرات کوچک در تخلخل، تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت گیری و چینش^{۵۱} آنها، تماماً بازتاب های خوبی

⁵¹ packing

را باعث می‌شوند [۲۵]. در نتیجه پدیده‌هایی نظیر سطح ایستابی، ساختارهای رسوبی و مرز بین واحدهای سنگی، بایستی به‌خوبی توسط روش GPR قابل آشکار سازی باشد.

مسئله‌ای که در اینجا بایستی مد نظر قرار گیرد، پهنای منطقه گذار^{۵۲} می‌باشد. منطقه گذار منطقه‌ای است که در آن گذردهی دی‌الکتریک تغییر می‌کند [۲۵]. هرچه پهنای این منطقه کمتر باشد و تغییر در گذردهی دی‌الکتریک تند و ناگهانی باشد، بازتاب امواج GPR شدیدتر بوده و فصل مشترک مزبور به راحتی قابل آشکار سازی می‌باشد. در صورتی که اگر پهنای این منطقه نسبت به طول موج غالب GPR بزرگ باشد، این فصل مشترک به خوبی آشکار سازی نشده و بیشتر انرژی سیگنال در این ناحیه اتلاف می‌شود. از جمله مرزهای تدریجی می‌توان به سطح ایستابی اشاره کرد که وجود زون موئینه در بالای این سطح این پدیده را سبب می‌شود. در این ناحیه مرز بین منطقه خشک و اشباع به صورت تدریجی تغییر می‌کند. با توجه به جنس سازند و اندازه دانه‌ها این منطقه دارای پهنای متفاوتی می‌باشد و همان‌طور که در شکل ۲-۴ دیده می‌شود، در رسوبات دانه ریز مانند رس‌ها و لای‌ها این ناحیه دارای پهنای بیشتری است. از این رو اکتشاف سطح ایستابی بطور معمول با استفاده از آنتن‌های فرکانس پایین (طول موج بالا)، صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۴: ضخامت منطقه گذار برای رسوبات با اندازه دانه‌ای مختلف (الف) به همراه مدل دی‌الکتریک آن (ب) [۴۰].

برای به دست آوردن یک مقیاس کمی از ضرایب بازتاب و مطالبی که تا کنون ذکر شد، توجه به جدول ۲-۲ می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود. در این جدول ϵ_{r1} و ϵ_{r2} گذردهی نسبی محیط‌های اول و دوم می‌باشند که

⁵² Transition zone

در ستون اول جدول به ترتیب فهرست شده‌اند. هر چه قدر مطلق ضریب بازتاب بزرگتر باشد، انرژی که به گیرنده می‌رسد بالاتر بوده و فصل مشترک مورد نظر بهتر آشکارسازی می‌شود. به عنوان مثال فصل مشترک خاک و فلز دارای ضریب بازتابی در حدود ۱- می‌باشد، به این معنی که تمام انرژی موج ارسالی از این فصل مشترک بازتاب می‌شود. از این‌رو فلزات مدفون در خاک اهداف بسیار مناسبی برای آشکارسازی توسط روش GPR می‌باشند. فصل مشترک خاک و سنگ، دارای ضریب بازتاب پایین‌تری نسبت به دیگر فصل مشترک-هاست. از اختلاف بین ضرایب بازتاب در این فصل مشترک‌ها می‌توان در تفسیر داده‌های GPR استفاده کرد.

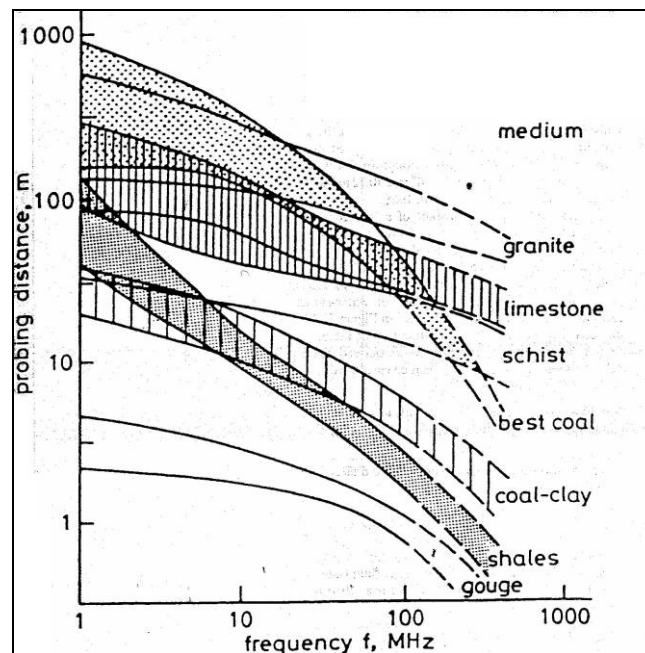
جدول ۲-۲: گذردهی نسبی محیط‌های مختلف، به همراه ضرایب بازتاب محاسبه شده برای فصل مشترک آنها [۴۱، ۱۲].

فصل مشترک	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	ضریب بازتاب
هوا - خاک خشک	۱	۴	-۰/۰۵
هوا - خاک مرطوب	۱	۲۵	-۰/۶۷
خاک خشک - خاک مرطوب	۴	۲۵	-۰/۴۳
خاک خشک - سنگ	۴	۶	-۰/۰۱
خاک مرطوب - سنگ	۲۵	۶	۰/۳۴
یخ - آب	۳/۲	۸۱	-۰/۶۷
خاک مرطوب - آب	۹	۸۱	-۰/۵
خاک مرطوب - هوا	۹	۱	۰/۵
خاک خشک - فلز	۴	۳۰۰	≈ -۱

۲-۱-۴- عمق نفوذ امواج GPR

عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس به مقاومت ویژه و گذردهی محیط انتشار و همچنین فرکانس موج مورد استفاده وابسته است.^{۵۳} کوک^{۵۳} در سال ۱۹۷۵ یک شکل شماتیک برای حداکثر عمق قابل دسترس برای

سنگ‌ها و محیط‌های مختلف زمین شناسی ارائه کرده است [۲۷]. همان‌طور که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود، موادی که دارای میزان رس بالایی هستند نسبت به سنگ‌های توده‌ای^{۵۴} دارای عمق نفوذ کمتری می‌باشند. این مسئله را می‌توان ناشی از رسانندگی بالاتر مواد حاوی رس نسبت به سنگ‌های توده‌ای دانست (جدول ۲-۱).



شکل ۲-۵: حداکثر عمق نفوذ قابل دسترس در مواد زمین‌شناسی مختلف به صورت تابعی از فرکانس مورد استفاده [۲۷].

در عمل استفاده از روش GPR در زمین‌های با مقاومت ویژه پایین (کمتر از ۱۰۰ اهم-متر) نامناسب است. این شرایط در محیط‌های سیلتی و رسی و در حضور آب‌های زیرزمینی، دیده می‌شود [۳۷].

۲-۱-۵- قدرت تفکیک

قدرت تفکیک، توانایی تفکیک دو پدیده نزدیک به هم می‌باشد و در خصوص قدرت تفکیک قائم، این مسئله توسط طول موج کنترل می‌شود [۱۹].

طول موج امواج الکترومغناطیس توسط رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

$$\lambda = \frac{V}{f} \quad (۱۰-۲)$$

در رابطه بالا V سرعت موج GPR در محیط، و f فرکانس آن می‌باشد.

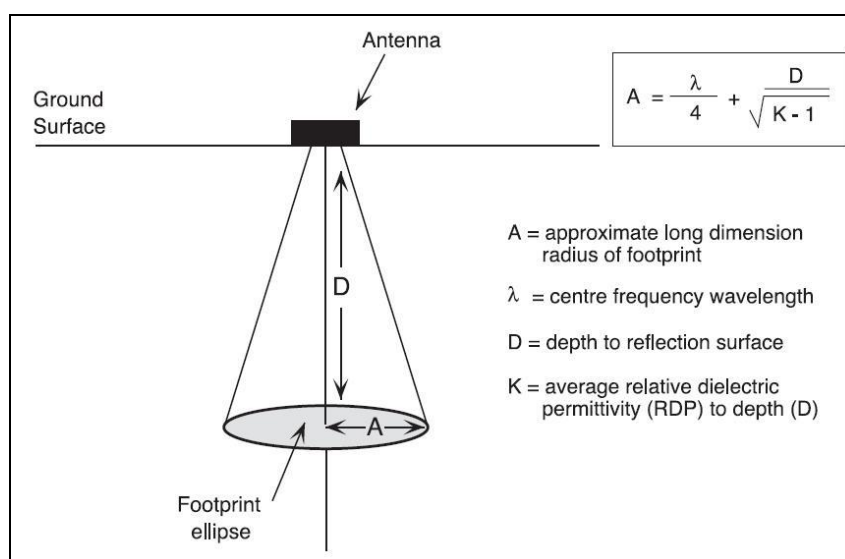
بهترین قدرت تفکیک عمودی یا قائم قابل دسترس برابر $\frac{1}{4}$ طول موج غالب GPR می‌باشد [۱۹]. اما برای گریز از اشتباه و همچنین لحاظ کردن تغییرات احتمالی در شکل موج، مقدار منطقی و محافظه کارانه‌ای برای قدرت تفکیک در نظر می‌گیرند. همان‌طور که از رابطه بالا دیده می‌شود با افزایش فرکانس، طول موج کاهش می‌یابد. از این‌رو برای فعالیت‌هایی که به قدرت تفکیک بالاتری احتیاج است، از آنتن‌های با فرکانس بالا استفاده می‌شود.

موج انتشار یافته زمانی که در زمین انتشار می‌یابد، مواد تشکیل دهنده زمین بر روی شکل و دامنه آن تأثیر گذاشته و اصطلاحاً آن را فیلتر می‌کنند [۲۶]. به همین ترتیب فرکانس مرکزی بازگشتی (فرکانسی که در پالس دریافتی در آنتن گیرنده بیشترین انرژی را دارد) به دلیل طبیعت اتلاف بیشتر فرکانس‌های بالا، نوعاً پایین‌تر از فرکانس مرکزی آنتن فرستنده بوده و در نتیجه تخمین واقع‌گرایانه‌تر از قدرت تفکیک عمودی از فرکانس مرکزی بازگشتی قابل تخمین می‌باشد. بهترین قدرت تفکیک عمودی ثبت شده در مواد کم اتلاف مانند شن و ماسه‌های خشک، با استفاده از آنتن‌های فرکانس بالا بین ۲ تا ۸ سانتیمتر می‌باشد [۲۵].

انرژی بازتاب شده که به آنتن گیرنده می‌رسد حاصل برخورد امواج الکترومغناطیس با یک نقطه خاص نمی‌باشد. این انرژی از سطح مشخصی از بازتاب کننده به گیرنده رسیده است. قدرت تفکیک افقی توسط این پارامتر کنترل می‌شود. در پروفیل‌زنی لرزه‌ای، عرض اولین منطقه فرسnel^{۵۵} مطابق با قدرت تفکیک افقی می‌باشد [۱۹]. عرض این منطقه تابعی از فرکانس موج مورد استفاده و عمق بازتاب کننده است. برای فرکانس‌های بالاتر عرض این منطقه کوچکتر بوده و سبب افزایش قدرت تفکیک افقی در این فرکانس‌ها می‌گردد. اگر گسترش جانبی بازتاب کننده‌ای بزرگتر از این مقدار باشد، شکل آن به خوبی روی مقطع زمانی دیده می‌شود. اما اگر گسترش جانبی بازتاب کننده کمتر از این مقدار باشد، امواج از سطح آن پراشیده شده و به جای شکل بازتاب کننده، پدیده پراش در مقطع زمانی برجسته خواهد بود. در چنین حالتی تشخیص شکل بازتاب کننده

⁵⁵ First Fresnel zone

در مقطع زمانی مشکل است. در مورد GPR نیز می‌توان از چنین رویکردی برای تعریف قدرت تفکیک افقی استفاده کرد. ولی به دلیل طبیعت دو قطبی امواج GPR شکل دایره‌ای منطقه فرسnel به صورت بیضی خواهد بود. شکل این بیضی و تفاوت در اندازه قطرهای کوچک و بزرگ آن، چنانچه از شکل ۲-۶ دیده می‌شود، تابعی از مشخصات زمین، فرکانس مورد استفاده و عمق بازتاب کننده می‌باشد. شکل این بیضی که از آن به عنوان ردپای GPR^{56} نیز یاد می‌شود [۱۲]، در مقادیر بالای گذردهی نسبی محیط به دایره نزدیکتر خواهد بود [۲۵].



شکل ۲-۶: ردپای GPR که به دلیل طبیعت دو قطبی امواج GPR بیضی شکل است [۲۵].

در خصوص قدرت تفکیک افقی مسئله حائز اهمیت دیگر، فاصله افقی بین ردها (فاصله ایستگاه‌های برداشتی) می‌باشد. با افزایش این فواصل قدرت تفکیک افقی کاهش می‌یابد. با توجه به هدف مورد مطالعه این فواصل می‌توانند مقادیر مختلفی را احراز نمایند. شرکت‌های سازنده دستگاه‌های GPR عموماً یک‌سری فواصل ایستگاهی برای آنتن‌ها و شرایط زمین‌شناسی مختلف توصیه می‌کنند [۳۰]. در عمل، به ویژه در مواردی که تغییرات زوایای ساختارهای مورد مطالعه کم است، مؤثرترین روش برای تعیین فواصل ایستگاهی، انجام یک-سری برداشت‌های آزمایشی است.

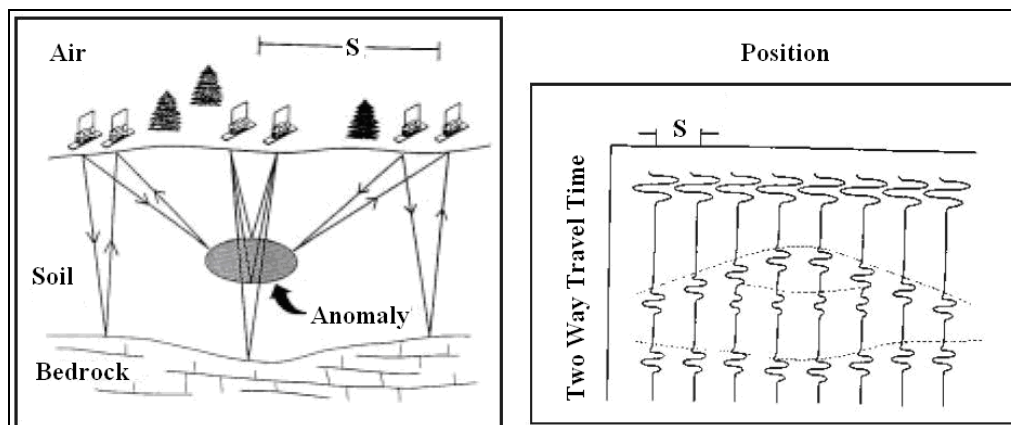
⁵⁶ Footprint

۲-۲- شیوه‌های برداشت داده

برداشت داده‌های GPR را می‌توان به ۳ شیوه عمده تقسیم‌بندی کرد.

۲-۲-۱- پروفیل‌زنی بازتابی^{۵۷} یا دورافت مشترک^{۵۸}

در این روش آنتن‌ها با فواصل ثابت روی سطح زمین جابه‌جا می‌شوند. زمان انتشار امواج GPR تا بازتاب‌کننده و بازگشت تا گیرنده اندازه‌گیری شده و در روی محور قائم و فواصل جابه‌جایی آنتن‌ها روی محور افقی نشان داده می‌شوند (شکل ۲-۷). اگر سرعت امواج GPR مستقلاً اندازه‌گیری شود و یا اینکه از داده‌های چاه‌نگاری به‌دست آید، عمق بازتاب‌کننده‌ها (اهداف زیر سطحی) قابل محاسبه می‌باشد. در این روش می‌توان هم از مُد تک آنتن و هم از مُد دو آنتن که قبلاً توضیح داده شد، بهره گرفت. در روش دورافت مشترک آرایش‌های مختلفی برای جهت‌گیری آنتن‌ها معرفی شده که با توجه به هدف مورد مطالعه می‌تواند اطلاعات بیشتری در اختیارمان قرار دهد. اما مرسوم‌ترین آرایش آنتن‌ها، آرایش با آنتن‌های موازی و عمود بر خطوط برداشت^{۵۹} داده‌ها است [۱۲].



شکل ۲-۷: شکل شماتیک از پروفیل‌زنی دورافت مشترک (سمت چپ)، به همراه مقطع زمانی آن (سمت راست) [۱۲].

⁵⁷ Reflection profiling

⁵⁸ Common offset

⁵⁹ Perpendicular-broadside

این روش پروفیل‌زنی که معمول‌ترین روش برداشت داده‌ها است، هم به صورت پروفیل‌زنی پیوسته و هم گسسته صورت می‌پذیرد. در روش پروفیل‌زنی گسسته، آنتن‌ها در موقعیت ثابت روی زمین قرار گرفته و بعد از انجام برداشت به ایستگاه بعدی منتقل می‌شوند. در این حالت چون آنتن‌ها ثابت بوده و جفت‌شدگی^{۶۰} بین آنتن‌ها و زمین مداوم است، بازتاب‌ها به صورت واضح و با دامنه بیشتری دیده می‌شوند [۲۵].

۲-۲-۲- برداشت‌های CMP/WARR

برداشت‌های نقطه میانی مشترک (CMP)^{۶۱} و بازتاب و شکست گشادزاویه (WARR)^{۶۲}، برای بدست آوردن تخمینی از تغییرات سرعت امواج GPR نسبت به عمق به کار می‌روند [۱۲، ۲۷]. در آرایش WARR، فرستنده در موقعیت ثابتی قرار گرفته و گیرنده در طول پروفیل جابه‌جا می‌شود. این شیوه از برداشت بایستی در منطقه‌ای انجام شود که بازتاب‌کننده‌های اصلی در منطقه برداشت، صفحه‌ای و افقی باشند و در صورت داشتن شیب، شیب آنها بسیار کم باشد. همچنین در استفاده از این روش فرض بر این است که مشخصات بازتاب‌کننده‌های زیر سطحی در تمام منطقه برداشت تغییر نمی‌کند. واضح است که چنین فرضی در همه جا صحیح نمی‌باشد. برای پرهیز از فرض آخر آرایش CMP را بکار می‌بریم، در این روش هر دو آنتن فرستنده و گیرنده حول نقطه‌ای ثابت، نسبت به هم جابه‌جا می‌شوند. در این روش بازتاب‌ها از یک نقطه مشترک زیر سطحی بدست می‌آیند و فرض یکنواخت بودن مشخصات زیرسطحی که در آرایش WARR در نظر گرفته شد، به این ترتیب حذف می‌شود.

در سیستم‌های اولیه GPR که از کابل‌های فلزی برای اتصالات استفاده می‌شده، از آرایش WARR استفاده می‌کردند. ولی با استفاده از سیستم‌های مدرن، از جمله دستگاه‌هایی که از کابل‌های فیبر نوری استفاده می‌کنند، آرایش CMP، به دلیل مزایای ذکر شده نسبت به آرایش WARR، روش استاندارد برداشت داده‌ها برای بدست آوردن سرعت در ساختارهای زیرسطحی می‌باشد [۱۲].

⁶⁰ Coupling

⁶¹ Common mid-point

⁶² Wide angle reflection and refraction

۲-۳-۲- توموگرافی GPR

اساس روش توموگرافی GPR بر اندازه‌گیری دقیق زمان پیمایش موج و دامنه پالسی که درون محیط منتشر می‌شود، بنا شده است [۳۱]. 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 محیط مورد بررسی قرار می‌گیرند. به این ترتیب که آنتن‌ها طوری قرار داده می‌شوند که امواج از طریق محیط تحت بررسی، فاصله آنتن فرستنده و گیرنده را مستقیماً طی 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.

از این روش برای بررسی‌های درون گمانه‌ای، بررسی سازه‌های انسانی از قبیل آزمایش توده‌های بتونی و بررسی ستون‌ها و پایه‌های پل‌ها، استفاده می‌شود [۲۷]. در معادن نیز با استقرار فرستنده در یک تونل و گیرنده در تونل دیگر، از این روش استفاده می‌شود.

۲-۳- پردازش داده‌های GPR

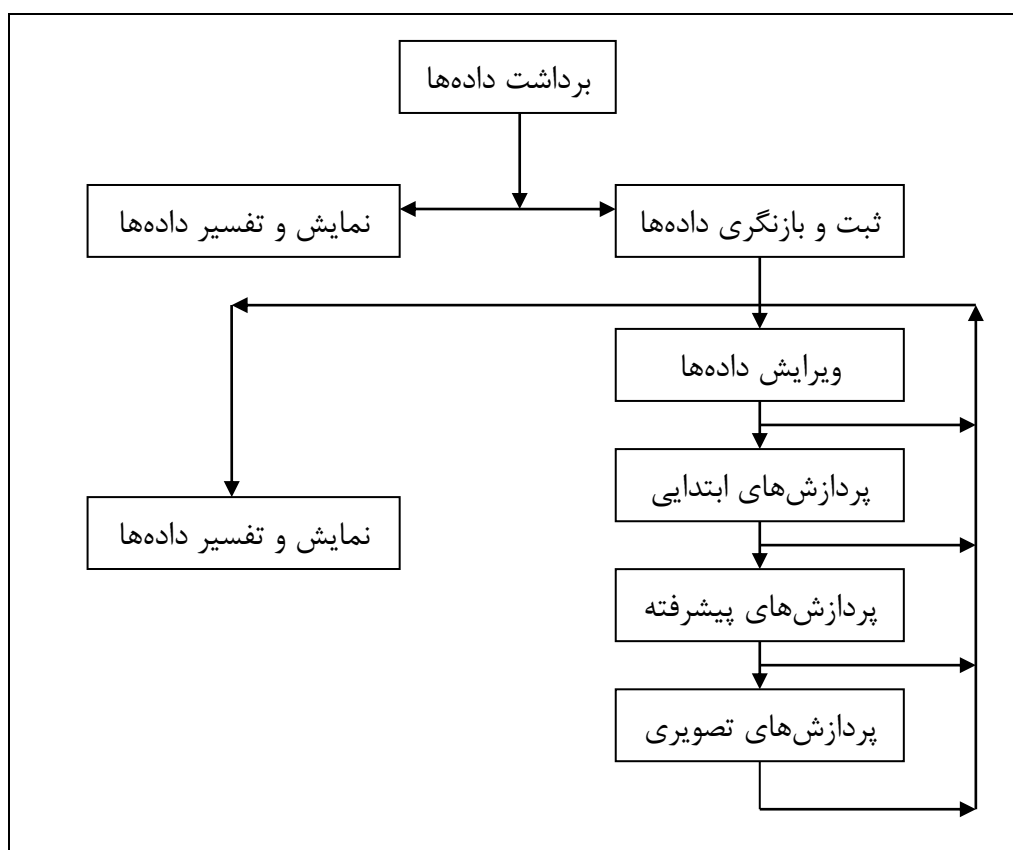
به‌طور کلی هدف از پردازش داده‌های ژئوفیزیک، غلبه بر محدودیت‌های ذاتی داده‌های برداشت شده، برای دستیابی به اطلاعات واقعی‌تر از اهداف زیرسطحی می‌باشد. در صورتی که پردازش بر روی داده‌ها اطلاعات دقیق‌تری در اختیارمان قرار دهد، در نهایت منجر به تفسیر منطقی و مطمئن‌تری خواهد شد.

در شکل ۲-۸ یک شکل شماتیک از نحوه پردازش داده‌های GPR نشان داده شده است. گستره پردازش‌هایی که بر روی داده‌های GPR بکار می‌روند توسط هدف مورد مطالعه تعیین می‌شود. بسته به نوع فعالیت‌ها دامنه پردازش‌ها متفاوت بوده و در پاره‌ای از موارد حتی ممکن است از اعمال پردازش‌های ابتدایی بر روی داده‌ها صرف نظر شود.

به علت شباهت روش GPR به روش لرزه‌نگاری بازتابی بیشتر روش‌های پردازش لرزه‌ای می‌تواند بر روی داده‌های GPR مستقیماً به کار روند [۲۵]. البته به دلیل تفاوت عمده در امواج بکار رفته در روش‌های ذکر شده

در بعضی موارد نیاز به بازنگری روش‌های پردازش لرزه‌ای در به‌کارگیری آنها در روش GPR احساس می‌شود. شرکت Sensors & Software یک سری نرم افزار کامپیوتری همراه با دستگاه‌های تولید شده ارائه می‌کند. داده‌هایی که توسط این نرم افزارها تولید می‌شوند، توسط نرم افزارهای لرزه‌نگاری قابل پردازش می‌باشند.

با توجه به هدف مورد مطالعه دامنه پردازش‌های مورد استفاده بر روی داده‌ها می‌تواند متفاوت باشد. به عنوان مثال فیلتر کردن داده‌ها برای حذف نوفه‌های محیطی که از پردازش‌های ابتدایی مورد استفاده در روش GPR می‌باشد، برای برجسته کردن بازتاب‌های زیرسطحی در برخی از کاربردها می‌تواند کافی باشد. در صورتی که در برخی دیگر از مطالعات، دامنه گسترده تری از پردازش‌ها مورد نیاز می‌باشد.



شکل ۲-۸: پردازش داده‌های GPR [۱۲].

در این بخش برخی از پردازش‌های اصلی موجود که می‌توانند بر داده‌های GPR به کار روند، مورد بحث قرار می‌گیرند. نوع و دامنه پردازش‌هایی که بر داده‌های GPR به کار می‌رود به مشخصات منطقه مورد مطالعه، دستگاه GPR، نرم افزارهای به کار رفته و همچنین اهداف کلی برداشت وابسته است [۲۵]. از این‌رو نیازی به

استفاده از تمام روش‌های پردازش ذکر شده بر روی تمامی داده‌ها نمی‌باشد. چه بسا در شرایطی اعمال برخی از پردازش‌ها منجر به ایجاد مشکلات ناخواسته بر داده‌ها شوند.

۲-۳-۱- تصحیح جابه‌جایی صفر زمانی

امواج در بازتاب و عبور از ساختارهای زیرسطحی، به صورت رویدادهای مجزا به صورت تابعی از زمان در گیرنده دریافت می‌شوند. اولین رویدادی که در گیرنده دریافت می‌شود، موج مستقیمی است که از طریق هوا از آنتن فرستنده به گیرنده می‌رسد [۱۲، ۲۷]. جابه‌جایی زمانی اولین رویداد و به واسطه آن جابه‌جایی در رویدادهایی ثانویه که در بین آنها پاسخ از اهداف زیرسطحی نیز موجودند، باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری‌ها می‌گردد. این خطا پیوستگی بازتاب‌های ناشی از اهداف زیرسطحی را از بین برده و در صورت لحاظ نشدن، تفسیر داده‌ها را با مشکلاتی همراه می‌سازد. این خطا زمانی که نمایشگر الکترونیکی به شدت سردتر و یا گرمتر از دمای محیط اطراف می‌گردد، رخ می‌دهد. سیم‌های آسیب دیده نیز می‌توانند باعث بوجود آمدن این خطا باشند، که البته در این صورت این خطا نامنظم است. به منظور جابه‌جایی زمانی اولین رویداد در طول ردهای برداشتی در پروفیل‌های بازتابی GPR، مجموعه نرم افزارهای GPR معمولاً این به خط شدگی را به صورت اتوماتیک با جابه‌جایی هر رد به صورت جداگانه، انجام می‌دهند [۳۲، ۳۳]. برای این منظور یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد در این نرم افزارها به کار می‌رود که به واسطه آن اولین رویداد (موج مستقیم هوا) را تشخیص دهند. مشکلی که در استفاده از این مقدار زمینه وجود دارد، استفاده از آن در مناطق با نوفه بالا می‌باشد. به این ترتیب که ممکن است در تشخیص اولین رویداد در تمامی ردها به علت وجود نوفه موفق نباشد. به خط شدگی موفقیت آمیز اولین رویداد باعث می‌شود که بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان به نمایش درآیند. از این‌رو اولین پردازش مورد استفاده بر روی داده‌ها، تصحیح جابه‌جایی صفر زمانی می‌باشد.

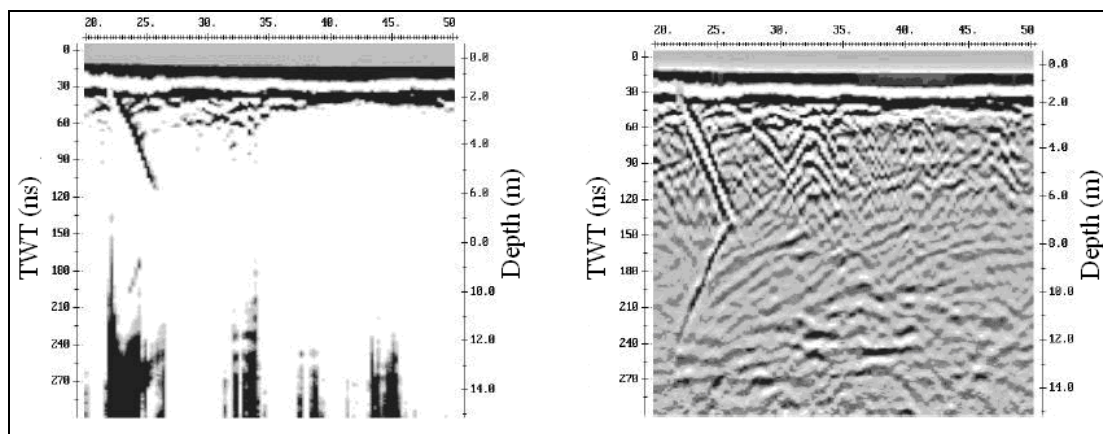
۲-۳-۲- تصحیح اشباع سیگنال^{۶۳}

به علت فواصل زمانی کوتاه بین پالس‌های ارسالی توسط فرستنده، و پالس‌هایی که به صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین وجود بازتاب‌هایی که از توده‌های کم عمق نشأت می‌گیرند، گیرنده

⁶³ Signal saturation

از سیگنال اشباع می‌شود [۲۵]. این مسئله سبب به وجود آمدن یک زوال آهسته فرکانس پایین که به wow معروف است، بر روی ردها می‌گردد. این زوال فرکانس پایین بر روی فرکانس‌های بالاتر قرار گرفته و آن‌ها را مغشوش می‌کند. اندازه و شدت این زوال فرکانس پایین به فاصله آنتن‌ها و همچنین مشخصات الکتریکی زمین وابسته است [۳۳].

برای حذف نوفه‌های فرکانس پایین wow معمولاً یک فیلتر بالا گذر بر داده‌ها اعمال می‌شود. شرکت Sensors & Software در مجموعه نرم افزارهایی که همراه دستگاه‌ها ارائه می‌کند، برای کاهش این نوفه‌ها دو راه حل استفاده از فیلتر Dewow و استفاده از فیلتر Dc-Shift را پیشنهاد می‌کند. در شکل ۲-۹ یک مقطع GPR قبل و بعد از اعمال فیلتر Dewow به نمایش درآمده است.



شکل ۲-۹: اثر wow بر داده‌های GPR (سمت چپ). بازتاب‌ها بعد از اعمال فیلتر Dewow به خوبی مشخصند (سمت راست) [۳۳].

Dewow یک فیلتر بالاگذر است که برای گذراندن پیک طیف سیگنال ارسالی برای فرکانس مرکزی یک آنتن خاص طراحی شده است. استفاده از فیلتر اجرای متوسط^{۶۴} در این روش فرکانس‌های پایین را حذف می‌کند. چنین فیلتری ممکن است یکسری مشکلات مصنوعی روی داده‌ها تولید کند. اولین مشکل، ایجاد یکسری نوسانات اضافی در ابتدا و انتهای رویدادها بوده و دومین مشکل زمانی ناشی می‌شود که اندازه wow بزرگ باشد. این امر سبب می‌شود که بعد از اعمال فیلتر Dewow بر داده‌ها یکسری مکان‌های بدون اعوجاج و اصطلاحاً مکان‌های خالی^{۶۵} روی ردها دیده شود. برای رفع مشکل اول می‌توان از یک فیلتر بالا گذر دیگر نظیر

^{۶۴} Running average

^{۶۵} Blank area

Dc-Shift بر روی داده‌ها استفاده کرد. این فیلتر ممکن است در استفاده از آنتن‌های با فرکانس بالا بسیار مفیدتر از Dewow واقع شود. اما در مورد مشکل دوم راه حل نرم افزاری برای رفع این مشکل وجود ندارد و با افزایش فاصله آنتن‌ها مقدار wow را کاهش می‌دهیم. برای این منظور استفاده از فواصل به اندازه طول آنتن‌های بکار رفته می‌تواند راهکار مناسبی باشد [۳۲].^{۶۶}

۲-۳-۳- به‌کارگیری بهره^{۶۷}ها

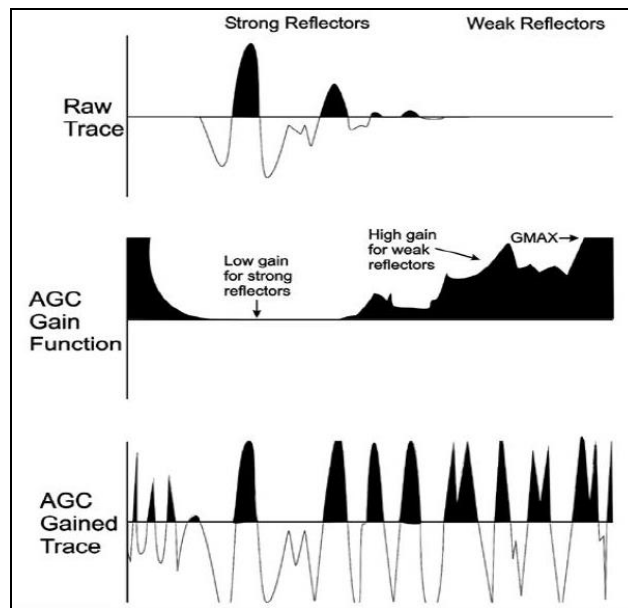
توان سیگنال انتشاری در توده‌های زیرسطحی با افزایش زمان پیمایش سیگنال مربوطه به صورت تصاعدی کاهش می‌یابد. از این رو پاسخ دریافتی از توده‌های عمیق، ضعیف تر می‌باشد. برای حل این مشکل با اعمال بهره بر روی داده‌ها، توان سیگنال در اعماق بیشتر را افزایش می‌دهیم. بهره یک تابع متغیر با زمان است و از بهره‌های مختلفی برای اعمال بر داده‌های GPR استفاده می‌شود. نرم افزارهای ارائه شده توسط شرکت Sensors & Software قابلیت اعمال چندین بهره مختلف بر روی داده‌ها را دارا می‌باشند.

در بررسی‌های رسوب شناسی به نقشه درآوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است. از این رو در بیشتر مطالعات رسوب شناسی از کنترل بهره اتوماتیک (AGC)^{۶۸} استفاده می‌شود (شکل ۲-۱۰). این بهره به طور معکوس با توان سیگنال متناسب است و بهره را در حدودی که کاربر تعریف می‌کند بر روی داده‌ها اعمال می‌کند. از این رو سعی در یکسان‌سازی تمام سیگنال‌ها دارد [۳۲].

^{۶۶} برای مطالعه بیشتر به منبع ذکر شده مراجعه کنید.

^{۶۷} Gain

^{۶۸} Automatic Gain Control



شکل ۲-۱۰: یک رد منفرد از یک پروفیل GPR قبل و بعد از به کارگیری کنترل بهره اتوماتیک (AGC) بر روی آن [۳۲].

همان طور که از شکل بالا دیده می شود بکارگیری بهره AGC بر روی داده ها تمامی بازتاب ها را یکسان می نماید. چنانچه در بخش های قبل ذکر شد، فصل مشترک های مختلف دارای توان های بازتاب مختلف بوده و هر یک مقداری از سیگنال ورودی را بازتاب می نمایند. به این ترتیب اطلاعات بدست آمده از دامنه نسبی سیگنال ها از بین خواهند رفت. این اطلاعات در برخی از کاربردها بسیار ارزشمند بوده و برای حفظ آنها از انواع مختلف بهره ها نظیر بهره گسترش و جبران نمایی (SEC)^{۶۹} استفاده می شود. این بهره از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال در محیط بهره می برد.

بهره SEC ترکیبی از بهره خطی و نمایی است. این بهره با توجه به محدودیت هایی که کاربر تعریف می کند و با استفاده از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج GPR در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ های بازتابی دارد [۳۳]. در استفاده از این بهره پارامترهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می گیرد، بسیار حائز اهمیت است. این پارامترها از جمله حداکثر^{۷۰} مقدار بهره که روی داده ها اعمال شود و همچنین اتلاف امواج GPR در محیط، برای بازسازی شکل بازتاب ها بسیار با اهمیت می باشند.

^{۶۹} Spreading & Exponential Compensating

^{۷۰} Maximum

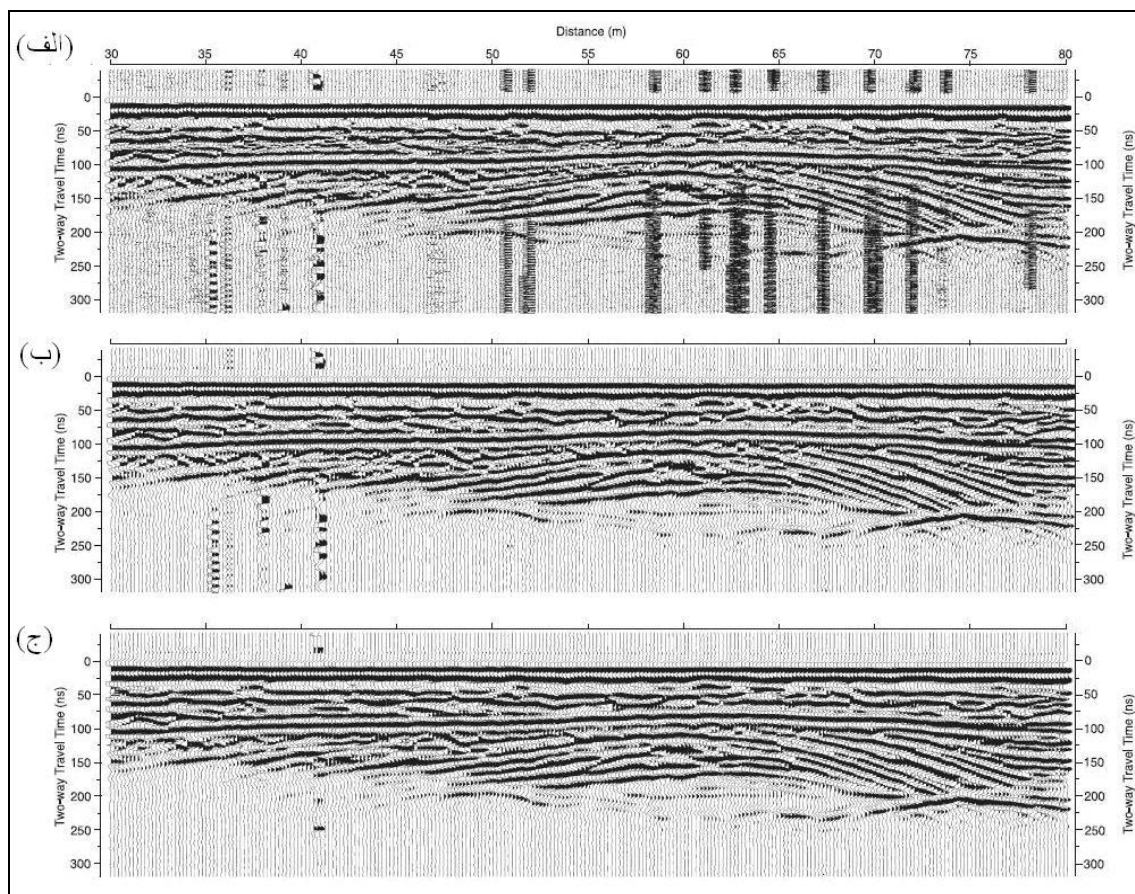
استفاده از بهره‌ها راهی بسیار مناسب برای نمایش داده‌ها می‌باشد. ولی نباید تأثیرات نامطلوب آن در برجسته کردن انواع نوفه‌های محیطی و سیستماتیک را نادیده گرفت. استفاده از بهره بایستی به دقت مورد توجه قرار گیرد تا اطلاعات مربوط که ساختارهای زیرسطحی را نمایش می‌دهند، بدون بوجود آمدن مشکلات بدست آیند.

۲-۳-۴- اعمال فیلترها

سیستم‌های GPR عموماً دریافت کننده‌های پهن باند^{۷۱} می‌باشند. از این رو ممکن است با منابع ساخت بشر از قبیل فرستنده‌های رادیویی FM، تلفن‌های همراه و برج‌های فرستنده آنها، بی‌سیم‌ها و سایر ارتباطات رادیویی دیگر در تداخل باشند. شکل ۲-۱۱ یک پروفیل برداشتی در نزدیکی یک فرودگاه نظامی می‌باشد. به تأثیر فرکانس‌های بالا در روی ردها در این شکل که ناشی از تداخل امواج رادیویی می‌باشد، توجه کنید.

در پاره‌ای از موارد، نوفه‌های زمینه^{۷۲} و تصادفی^{۷۳} با انباش (دسته کردن)^{۷۴} ردها به هنگام برداشت داده‌ها، کاهش می‌یابند. در بعضی مواقع هم با انتخاب آنتن‌های با فرکانس متفاوت با نوفه‌ها از ایجاد چنین مشکلاتی بر روی داده‌ها اجتناب می‌شود. البته با افزایش تعداد ردهای دسته شده در ایستگاه‌های برداشت، زمان لازم برای اکتساب داده‌ها افزایش می‌یابد و انتخاب فرکانس متفاوت با نوفه‌ها ممکن است با اهداف اولیه برداشت از جمله عمق نفوذ و قدرت تفکیک مورد نظر سازگار نباشد [۲۵].

⁷¹ Wideband
⁷² Background
⁷³ Random
⁷⁴ Stack



شکل ۲-۱۱: نوفه‌های محیطی فرکانس بالا که بر روی بازتاب‌های اولیه قرار گرفته‌اند و آنها را مغشوش کرده‌اند (الف). تقریباً تمامی نوفه‌ها با اعمال فیلتر پایین گذر بر روی داده‌ها حذف شده‌اند (ب). ردهای منفردی که فیلتر پایین گذر نوفه‌های آنها را حذف نکرده با اعمال فیلتر مکانی بر روی داده‌ها حذف شده‌اند (ج) [۲۵].

از جمله نوفه‌های دیگر موجود بر روی داده‌ها، می‌توان به وجود نوفه‌های سیستماتیک و منظم اشاره کرد. از معمول‌ترین نوفه‌های سیستماتیک، نوفه رینگینگ^{۷۵} می‌باشد. این نوفه ناشی از اضافه بار الکتریکی در آنتن‌ها بوده و در سیستم‌هایی که از کابل‌های فلزی برای اتصال آنتن‌ها به کنسول استفاده می‌کنند، بسیار معمول است [۲۵]. این خطا از آنجا ناشی می‌شود که این کابل‌ها همانند یک آنتن فرستنده دیگر عمل می‌کنند. این اثر در دستگاه‌های پیشرفته با استفاده از کابل‌های فیبر نوری کاهش یافته است. نوفه رینگینگ زمانی که سیگنال GPR بین یک بازتاب کننده با رسانندگی الکتریکی بالا و آنتن‌ها قرار می‌گیرد، به دلیل بازتاب‌های پیاپی این سیگنال در این فاصله نیز ممکن است رخ دهد. آب‌های شور و رس‌های رسا نیز ممکن است نوفه رینگینگ فرکانس بالا را سبب شوند.

⁷⁵ Ringing

فیلترها با استفاده از ابزارهای ریاضی شکل هر رد جداگانه را در برجسته و یا حذف برخی از اثرها تغییر می‌دهند. اساساً دو نوع فیلتر وجود دارد، فیلترهای زمانی که بر روی هر رد به صورت جداگانه اعمال می‌شوند و فیلترهای مکانی که به صورت افقی بر روی ردهای همجوار اعمال می‌شوند [۳۳]. از جمله فیلترهای مکانی که در این پایان نامه نیز از آن استفاده شده است، می‌توان به فیلتر تفریق زمینه^{۷۶} اشاره کرد. این فیلتر سعی در افزایش اثر بازتاب‌های با شیب تند، نظیر دنباله هذلولی^{۷۷}ها و همچنین کاهش اثر بازتاب کننده‌های افقی و با شیب کم دارد.

در استفاده از میانگین‌گیری افقی (از جمله فیلترهای مکانی) همچنین مزایایی از جمله برجسته کردن اثر بازتاب کننده‌های افقی و دارای شیب کم و همچنین حذف و کاهش اثر بازتاب کننده‌های با شیب تند و قائم وجود دارد. از جمله معایب این گونه میانگین‌گیری‌ها می‌توان به کاهش قدرت تفکیک افقی و قائم اشاره کرد [۲۵، ۳۳].

در حذف نوفه‌های محیطی و سیستماتیک که دارای فرکانسی متفاوت با فرکانس سیگنال می‌باشند، معمولاً از فیلترهای حوزه فرکانس استفاده می‌کنیم [۱۹، ۳۹]. این فیلترها سعی دارند یک باند فرکانس خاص را از روی داده‌ها حذف کنند. همان‌طور که در شکل ۲-۱۱ دیده می‌شود، تقریباً تمامی نوفه‌های محیطی موجود در شکل (الف) با استفاده از فیلتر فرکانس پایین‌گذر حذف شده‌اند (شکل (ب)). مسئله قابل توجه در این شکل حفظ ویژگی‌های اصلی بازتاب‌های اولیه به دلیل حفظ انرژی در اطراف فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده است. همچنین کاهش قدرت تفکیک پروفیل به دلیل حذف فرکانس‌های بالا مشهود است. در شکل (ب) تعدادی از نوفه‌های فرکانس پایین که فرکانس آنها در حدود فرکانس آنتن مورد استفاده است، باقی مانده‌اند. این نوفه‌ها با استفاده از فیلترهای مکانی میانگین‌گیری افقی در شکل (ج) حذف شده‌اند.

در استفاده از پردازش‌های ابتدایی نظیر بهره‌ها و فیلترها بایستی به این نکته توجه داشت که این‌گونه پردازش‌ها نباید به طور کلی داده‌ها را تغییر دهند. بلکه آنها به این منظور بر داده‌ها اعمال می‌شوند که ابعاد و جنبه‌های مورد علاقه بر روی مقاطع GPR را برای مطالعات بعدی افزایش دهند [۱۱].

⁷⁶ Background subtraction

⁷⁷ Hyperbola

۲-۳-۵- تصحیحات توپوگرافی

به طور کلی وجود توپوگرافی نامنظم بر اکثر داده‌های ژئوفیزیک تأثیرات نامطلوبی دارد. از آنجا که دستگاه‌های GPR زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند، وجود توپوگرافی نامنظم نیز می‌تواند تغییرات بارزی در مقاطع GPR را سبب شود. آنتن‌های GPR امواج را به صورت مخروط سه بعدی درون زمین منتشر می‌کنند. از آنجا که موج منتشر شده به سمت پایین همواره عمود بر سطح زمین بوده، از این رو در سطوح شیب دار موج منتشر شده به صورت عمود به سمت پایین نبوده و دارای یک مؤلفه افقی می‌باشد. اندازه این مؤلفه افقی با افزایش شیب افزایش می‌یابد. این موضوع معمولاً در برخورد با شیب‌های بزرگتر از 6° به علت اشتباه در تعیین موقعیت دقیق بازتاب‌ها حائز اهمیت بوده و شیوه‌های متفاوتی از پردازش داده‌ها را طلب می‌کند [۲۲].

برای تصحیح توپوگرافی با توجه به سرعت امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی، ردها به اندازه‌ای که توپوگرافی سطح زمین روی آن لحاظ شود، نسبت به یک سطح مبنا جابه‌جا می‌شوند.

برای برداشت توپوگرافی معمولاً از دوربین‌های نقشه برداری مانند نوع توتال و تئودولیت لیزری و یا از GPS های تفاضلی^{۷۸} استفاده می‌شود [۲۵]. دستگاه‌های شرکت Sensors & Software قابلیت اتصال به GPS را دارا می‌باشند. به این ترتیب که برای سهولت در انجام عملیات صحرایی و افزایش سرعت برداشت، به ازای هر رد برداشتی GPR یک نقطه GPS برداشت می‌شود، این نقاط به صورت خودکار در حافظه دستگاه ذخیره شده و به همراه فایل‌های مربوط به داده‌های GPR به کامپیوتر انتقال می‌یابند. نرم افزارهای ارائه شده توسط این شرکت با در نظر گرفتن اطلاعات مزبور به راحتی تصحیحات توپوگرافی را بر داده‌ها اعمال می‌کنند.

۲-۳-۶- مهاجرت^{۷۹}

پردازش مهاجرت سعی در حذف پراش‌ها، اغتشاش‌ها^{۸۰}، جابه‌جایی‌های شیب و بازتاب‌های خارج از خط دارد. این پردازش از جمله پردازش‌های پیشرفته‌ای است که بر روی داده‌های GPR اعمال می‌شود. این پردازش را می‌توان به عنوان یک نمونه از پردازش‌های واپیچش^{۸۱} تلقی کرد [۳۹]. پردازش مهاجرت برای اولین بار در

⁷⁸ Differential

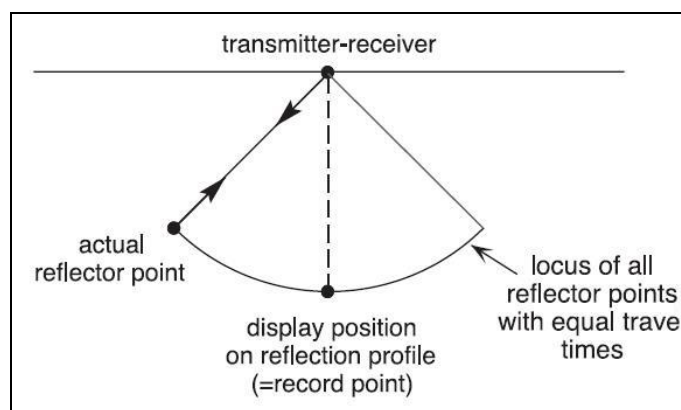
⁷⁹ Migration

⁸⁰ Distortion

⁸¹ Deconvolution

سال ۱۹۲۱ بر روی داده‌های لرزه‌نگاری بازتابی صورت گرفت و تا امروز از پردازش‌های معمول بر داده‌های لرزه‌ای است [۲۵].

فرض اینکه بازتاب‌های مشاهده شده بر روی مقاطع GPR مستقیماً زیر نقاط برداشت واقع‌اند، خطاهای بارزی را سبب می‌شود. آنتن‌های GPR امواج الکترومغناطیس را به صورت یک مخروط پیچیده سه بعدی به درون زمین ارسال می‌کنند. در نتیجه یک بازتاب بر روی ردهای ثبت شده می‌تواند از هر کجای این جبهه موج نشأت گرفته باشد. و همان‌طور که در شکل ۲-۱۲ دیده می‌شود، بازتاب‌ها از هر کجای جبهه موج که نشأت گرفته باشند، در محل برداشت داده‌ها نمایش داده می‌شوند.



شکل ۲-۱۲: در داده‌های مهاجرت نیافته، بازتاب کننده واقع در هر قسمت جبهه موج در محل ایستگاه برداشت به نمایش در می‌آید [۲۵].

طبیعت انتشار سه بعدی امواج باعث بوجود آمدن مشکلاتی در داده‌های GPR می‌گردد. به این ترتیب که اهداف نقطه‌ای به دلیل پراش امواج GPR در برخورد با آنها به صورت بازتاب‌های هذلولی شکل در مقاطع GPR، دیده می‌شوند [۱۹]. منظور از اهداف نقطه‌ای، اشیایی با ابعاد تقریبی طول موج فرکانس مرکزی آنتن به کار رفته و یا کوچکتر از آن می‌باشد. هر چند در اکتشاف این گونه اهداف، مانند لوله‌ها و کابل‌های مدفون که عمود بر خطوط برداشت واقع‌اند، استفاده از این اشکال می‌تواند مفید واقع شود، اما در مواردی که هدف به نقشه درآوردن ساختارهای دیگری از جمله لایه‌بندی رسوبات بوده، قرار گرفتن این پراش‌ها بر روی بازتاب‌های اولیه، ممکن است مفسر را در تشخیص بازتاب‌های اولیه دچار اشتباه کند.

در مقاطع مهاجرت نیافته همچنین در ثبت دقیق شیب بازتاب کننده‌های شیب دار نیز دچار مشکل خواهیم بود. شیب بازتاب کننده‌هایی که در مقاطع GPR دیده می‌شوند، کمتر از مقدار واقعی آنها است. به این ترتیب که رابطه بین شیب ظاهری و واقعی از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۹].

$$\sin \alpha_t = \tan \alpha_s \quad (۱-۲)$$

α_t شیب واقعی بازتاب کننده و α_s شیب ظاهری که در مقطع GPR ثبت شده است، می‌باشد. همان‌طور که از رابطه بالا دیده می‌شود با افزایش شیب بازتاب کننده، خطا در تخمین شیب بیشتر می‌شود. به عنوان مثال در برخورد با بازتاب کننده‌های قائم، شیب ثبت شده در مقاطع GPR، 45° می‌باشد. شکل لایه‌بندی‌های موج مانند تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها در مقاطع GPR به خوبی دیده نمی‌شود. به این ترتیب که ناودیس‌ها کوچکتر و تاقدیس‌ها بزرگتر از اندازه واقعی‌شان بر روی مقاطع GPR دیده می‌شوند. آشکارسازی این پدیده‌ها در مقاطع پردازش نشده تابعی از انحناء جبهه موج نسبت به انحناء این بازتاب کننده‌ها است [۱۹، ۲۵]. به طوری که در پاره‌ای از موارد شکل بازتاب به طور کلی متفاوت از شکل واقعی بازتاب کننده است. ارائه تفسیری مطمئن در برخورد با چنین اشکالی در داده‌های پردازش نشده، کاری سخت و در برخی موارد غیر ممکن است. بازتاب‌های خارج از خط نیز می‌توانند باعث نقصان بر روی پروفیل‌های GPR شوند. چنین بازتاب‌هایی ممکن است از سطوح ناپیوسته و یا از اهداف کوچک ایزوله شده که در اطراف پروفیل موجود است، نشأت گرفته باشند.

در صورت لحاظ نکردن چنین اثراتی ممکن است تفسیر غلطی از پروفیل‌های بازتابی ارائه شود. برای تصحیح این اثرات از پردازش مهاجرت استفاده می‌شود. روش پردازش مهاجرت لرزه‌ای در صورتی که از قوانین انتشار هندسی نور تبعیت کند و انتشار انرژی به صورت خطی و غیر پیچشی باشد، قابل استفاده بر داده‌های GPR می‌باشد. این شرایط زمانی که رسانندگی ساختارهای زیرسطحی کوچک بوده و فرکانس در محدوده معمول GPR باشد، برقرار می‌باشد. در چنین شرایطی روش مهاجرت لرزه‌ای معمولاً می‌تواند به طور مستقیم بر روی داده‌های GPR به کار رود [۱۵].

هدف از پردازش مهاجرت شبیه ساختن پروفیل‌های بازتابی به ساختارهای زمین‌شناسی در خط برداشت می‌باشد. این پردازش سعی در تعیین محل دقیق رویدادهای بازتابی زیرسطحی دارد. به دلیل عدم قطعیت‌های گوناگون، در عمل معمولاً یک تصویر بهبود یافته ولی هنوز ناقص به دست می‌آید. چنین بهبودی در تصاویر در مطالعات رسوب شناسی از آنجا که طبیعت و فرم واحدهای چینه شناسی و ساختارهای رسوبی اولیه اهمیت اساسی و غایت نهایی در این مطالعات است، بسیار مفید می‌باشند.

مهاجرت داده‌های GPR هم به صورت دو بعدی و هم به صورت سه بعدی امکان‌پذیر است. در مهاجرت دو بعدی فرض بر این است که در پروفیل‌های GPR هیچ اثری از بازتاب‌های خارج از خط وجود ندارد. از آنجا که امواج در روش GPR به صورت سه بعدی منتشر می‌شوند، امکان وجود چنین بازتاب‌هایی در مقاطع GPR محتمل است. از این‌رو چنین اثراتی با استفاده از مهاجرت دو بعدی داده‌های GPR از روی مقاطع حذف نمی‌شوند. این اثرات تنها با برداشت داده‌ها به صورت سه بعدی و مهاجرت سه بعدی آنها حذف می‌شوند [۱۹، ۲۵].

۲-۳-۷- روال پردازش داده‌ها

مسئله مهمی که در این بخش به آن می‌پردازیم، روال و توالی پردازش داده‌ها است. به این ترتیب که پردازش‌های ذکر شده با چه ترتیبی بر روی داده‌ها به کار می‌روند. یک پردازشگر در حین پردازش داده‌ها با ۳ مسئله اساسی روبرو است.

(۱) انتخاب یک ترتیب مناسب برای مراحل پردازش

(۲) انتخاب پارامترهای مناسب مورد نیاز در هر مرحله از پردازش

(۳) ارزیابی خروجی ناشی از هر مرحله پردازش و تشخیص مشکلات ناشی از انتخاب ناصحیح پارامترها با توجه به مطالبی که ذکر شد، با انتخاب متفاوت روال پردازش و پارامترهای مورد نیاز هر مرحله پردازش، ممکن است از یک سری داده اولیه به پاسخ‌های مختلفی برسیم. توانایی پردازشگر در انتخاب پارامترها و انتخاب‌های مناسب، معمولاً به اندازه تأثیر یک الگوریتم پردازش مناسب، برای رسیدن به یک تصویر با کیفیت نهایی، حائز اهمیت می‌باشد.

با توجه به مطالبی که ذکر شد برای پردازش داده‌ها دامنه گسترده‌ای از انتخاب‌ها موجود است و پردازش‌گران با توجه به الگوریتم‌های موجود، هدف‌های مورد مطالعه، و تجربیات و توانایی هایشان انتخاب‌های مختلفی را در نظر می‌گیرند. هرچند در پردازش داده‌های GPR و لرزه‌ای نظریات متفاوتی موجود است ولی "ایلماز"^{۸۲} معتقد است که پردازش نمی‌تواند تنها یک مقصود باشد و با کمی توجه بیشتر یک هنر است تا یک علم"^[۲۵].

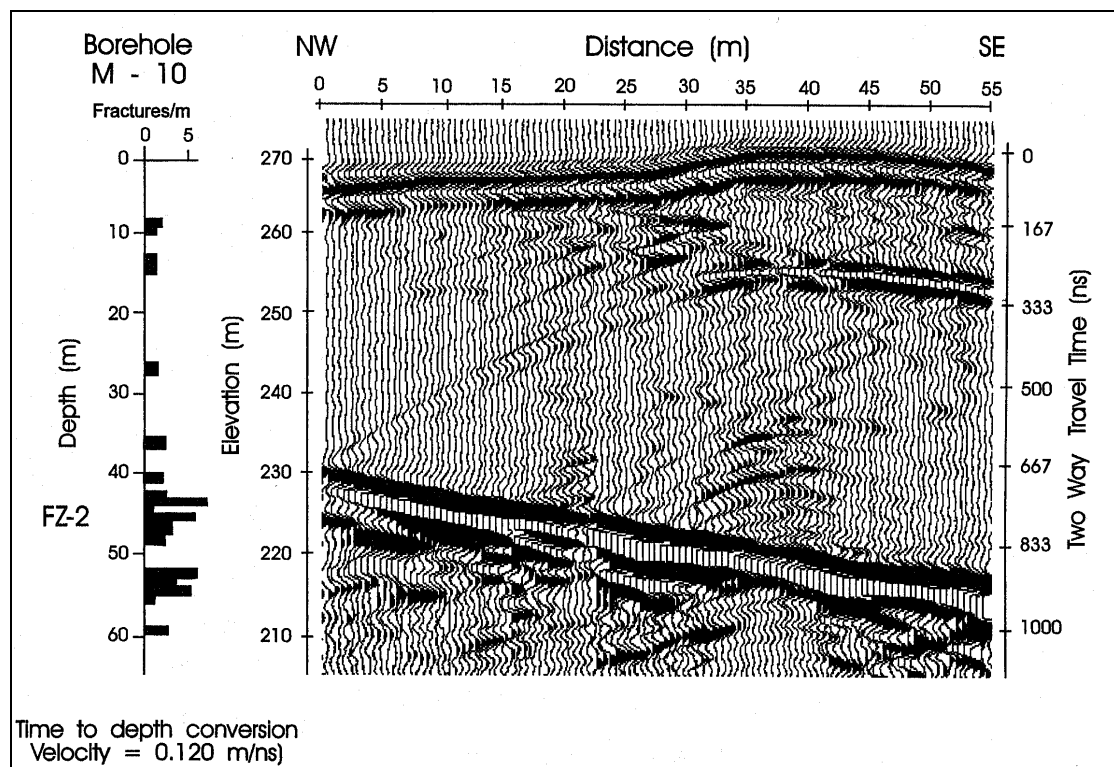
۲-۴- تفسیر داده‌های GPR

همانند روش‌های پردازش که در بخش قبل به آن اشاره شد، با توجه به هدف مورد مطالعه، هزینه‌ها، دستگاه و نرم افزارهای مورد استفاده، تفسیر داده‌های GPR نیز به روش‌های مختلفی صورت می‌پذیرد. به طور کلی تفسیر داده‌های GPR را می‌توان به دوبرخشی عمده، تفسیر کمی و تفسیر کیفی، تقسیم‌بندی کرد. هدف از تفسیر کمی داده‌ها، استخراج ویژگی‌های فیزیکی مورد نظر از روی اطلاعات موجود در مقاطع GPR می‌باشد. این‌گونه تفسیرها در مطالعات آلودگی آب‌های زیرزمینی، مهندسی مخازن آب و هیدروکربور و توموگرافی GPR بسیار مورد توجه بوده و GPR اطلاعات ارزشمندی از اینگونه محیط‌ها در اختیار مفسران قرار می‌دهد. هرچند مطالعات در خصوص تفسیر کمی داده‌ها تا حدود زیادی به شرایط کنترل شده آزمایشگاهی محدود است، ولی با توجه به تحقیقات و مطالعات گسترده در این زمینه، در آینده‌ای نزدیک پیشرفت‌های قابل توجه در این زمینه بسیار محتمل است.

تفسیر کیفی داده‌ها که به تفسیر گرافیکی نیز معروف است، بعد از اعمال پردازش‌های مناسب بر روی داده‌ها صورت می‌پذیرد. این روش تفسیر با استفاده از مشخصات بارز روی مقاطع GPR صورت می‌پذیرد. به این ترتیب که مقاطع زمانی بدست آمده ممکن است با استفاده از سرعت امواج GPR در محیط زیرسطحی به مقاطع عمقی تبدیل شده و یا اینکه به صورت مستقیم در دست تفسیر قرار گیرند. در این نوع تفسیر، مفسر در واقع کیفیت و شکل بازتاب‌ها را نسبت به بازتاب‌های مجاور تشخیص داده و با توجه به ویژگی این بازتاب‌ها از جمله پیوستگی، بزرگی و گسترش آنها، این رویدادها را از یکدیگر تفکیک می‌نمایند.

در شکل ۲-۱۳ یک نمونه از تفسیر کیفی داده‌های GPR که در برنامه مدیریت زباله‌های سوخت هسته‌ای کانادا انجام شده، آورده شده است. هدف از این بررسی به نقشه در آوردن شکستگی‌ها در سنگ‌های آذرین درونی می‌باشد. سنگ‌ها بیشتر بافت پرفیری دارند و از گنیس همراه با میان بار تصادفی^{۸۳} گرانیت و گرانیت-مونزونیت تشکیل یافته‌اند. فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده ۲۵ مگاهرتز بوده و تبدل عمق با استفاده از سرعت به دست آمده از روش CMP صورت گرفته است. طرح برجسته در شکل ۲-۱۳، یک بازتاب پیوسته خیلی قوی می‌باشد. عمق این بی‌هنجاری در ابتدای شمال غربی پروفیل، ۴۰ متر و در انتهای جنوب غربی آن ۵۰ متر می‌باشد. این بازتاب کننده توسط گمانه M-10 تأیید شده و منطبق بر منطقه ترک خورده FZ-2 می‌باشد. شدت شکستگی در سمت چپ شکل نشان داده شده است. به نظر می‌رسد که این منطقه از دو فصل مشترک موازی هم تشکیل یافته است. طرح دیگر که آن نیز احتمالاً منطقه شکسته است، از ۳۰ تا ۵۵ متری در طول پروفیل گسترش داشته و در عمق تقریبی ۱۵ تا ۲۰ متر واقع است. در این شکل یک هذلولی ضعیف که رأس آن در سمت چپ این بازتاب کننده واقع است، نمایان می‌باشد. پراش از گوشه این بازتاب کننده سبب ایجاد چنین طرحی شده است. دو بازتاب قوی نزدیک سطح، امواجی هستند که از فرستنده به صورت مستقیم از طریق هوا و زمین به گیرنده می‌رسند.

⁸³ Xenolithic



شکل ۲-۱۳: به نقشه درآوردن شکستگی‌ها در سنگ‌های آذرین درونی [۲۶].

فصل سوم

روش‌های الکتریک

کاوش‌های الکتریکی با آشکارسازی اثرهای سطحی حاصل از عبور جریان در داخل زمین سروکار دارند. در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیک نظیر ثقل سنجی، مغناطیس و رادیواکتیویته که در آنها تنها یک میدان

نیرو یا ویژگی بی‌هنجار مورد استفاده قرار می‌گیرد، روش‌های الکتریکی از تنوع بیشتری نسبت به دیگر روش‌های ژئوفیزیکی برخوردارند. با به‌کارگیری روش‌های الکتریکی می‌توان پتانسیل‌ها، جریان‌ها و میدان‌های الکترومغناطیس را که به‌طور طبیعی در زمین موجودند و یا به‌طور مصنوعی در آنها ایجاد می‌شوند، اندازه‌گیری کرد. روش‌های الکتریک اغلب بر حسب نوع منبع انرژی مورد استفاده (طبیعی یا مصنوعی) طبقه‌بندی می‌شوند [۴].

هدف اصلی عمده روش‌های الکتریکی، اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین است. در این روش‌ها، برای اینکه یک ویژگی زیرسطحی مشخص شود، باید مقاومت ویژه الکتریکی آن به‌طور بارزی متفاوت از محیط اطرافش باشد. بنابراین، استفاده از روش‌های الکتریکی، به حالت‌هایی که یک تباین مقاومت ویژه وجود داشته باشد، محدود می‌شود. در این روش‌ها، ویژگی‌های زمین‌شناسی، آب‌های زیرزمینی و سایر خصوصیات موجود، به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نمی‌شود. بلکه برای تفسیر مناسب داده‌های الکتریکی، نیاز به یک‌سری اطلاعات خارجی می‌باشد. در بعضی مواقع، داده‌های کمکی بسیار پراکنده بوده و برای محدود کردن تفسیرهای ممکن برای داده‌های الکتریک، مناسب نمی‌باشند. در بعضی موارد هم اطلاعات کمکی منجر به محدود کردن تفسیرها و انتخاب یک‌سری خصوصیات زمین‌شناسی با توجه به داده‌های الکتریکی، می‌گردند [۶].

از میان روش‌های مختلف الکتریکی روش مقاومت ویژه از کاربرد گسترده‌ای برخوردار است. یکی از دلایل این امر آن است که دامنه تغییرات مقاومت ویژه سنگ‌ها و کانی‌ها بسیار وسیع می‌باشد [۲۳]. روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی در اوایل دهه ۱۹۰۰ ابداع شدند، اما از دهه ۱۹۷۰ و خصوصاً به دلیل دسترسی به کامپیوتر برای پردازش و تجزیه و تحلیل داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند. این روش‌ها به‌طور مؤثری برای اکتشاف منابع آب زیرزمینی، بررسی انواع آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی، آشکارسازی محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌ها و مناطق خردشده و غیره در مسائل مهندسی، و همچنین بقایای ساختارهای مدفون در بررسی‌های باستان‌شناسی و کاربردهای متنوع دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۷].

۳-۱- روش مقاومت ویژه

هدف از برداشت های مقاومت ویژه، تعیین توزیع زیرزمینی مقاومت ویژه با استفاده از اندازه گیری های سطحی می باشد. از این اندازه گیری ها، مقاومت ویژه واقعی توده های زیرسطحی قابل تخمین است. اندازه گیری های مقاومت ویژه الکتریکی چندین دهه در بررسی های ژئوتکنیک، معدنی، آب های زیرزمینی و اخیراً مطالعات زیست محیطی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳].

در اندازه گیری های مقاومت ویژه با تزریق جریان به درون زمین از طریق دو الکتروود جریان و اندازه گیری اختلاف ولتاژ حاصل میان دو الکتروود پتانسیل، مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی قابل تخمین است.

در شکل ۳-۱ که یک آرایش چهار الکتروودی را نشان می دهد. الکتروودهای A و B الکتروودهای جریان و الکتروودهای M و N الکتروودهای پتانسیل می باشند. معادله (۳-۱) معادله اساسی برای محاسبه مقاومت ویژه ظاهری برای هر نوع آرایش الکتروودی است [۴].

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\left\{ \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right\}} \frac{\Delta V}{I} \quad (۳-۱)$$

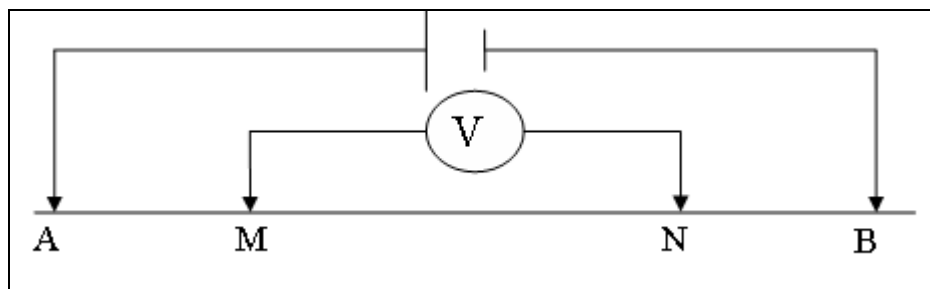
در این رابطه، I شدت جریان ارسالی (برحسب آمپر)، ΔV اختلاف پتانسیل قرائت شده (برحسب ولت) و ρ_a مقدار مقاومت ویژه ظاهری^{۸۴} (برحسب اهم-متر) می باشد.

در یک زمین همگن و همسانگرد، این مقاومت ویژه برای هر جریان و هر آرایش الکتروودی ثابت بوده و برابر مقاومت ویژه حقیقی یا واقعی^{۸۵} زمین همگن می باشد [۴]. یعنی اگر جریان ثابت نگه داشته شود و الکتروودها به اطراف حرکت کنند، پتانسیل ΔV در هر آرایش طوری تغییر می کند که مقاومت ویژه حاصل ثابت باقی بماند. در صورتی که اگر زمین غیرهمگن باشد و فواصل الکتروودی تغییر کنند و یا فواصل ثابت بوده در حالی که مجموعه آرایش تغییر مکان یابد، مقاومت ویژه کلاً تغییر خواهد یافت. نتیجه این است که در هر اندازه گیری

⁸⁴ Apparent resistivity

⁸⁵ True resistivity

مقدار متفاوتی از مقاومت ویژه ظاهری حاصل می‌شود. واضح است که بزرگی این مقدار با آرایش الکترودها ارتباط نزدیک دارد. اگر چه این مقاومت ویژه ظاهری تا حدودی مشخص کننده مقاومت ویژه واقعی منطقه‌ای در نزدیکی مجموعه الکترودها است، ولی قطعاً یک مقدار مطلق نخواهد بود.



شکل ۳-۱: آرایش چهار الکترودی

رابطه بین مقاومت ویژه حقیقی و ظاهری رابطه‌ای پیچیده است. برای تعیین مقاومت ویژه حقیقی ساختارهای - های زیرسطحی از روی مقادیر ظاهری آن، از روش‌های معکوس سازی توسط نرم افزارهای کامپیوتری استفاده می‌شود [۲۳].

۳-۱-۱- مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی

برداشت‌های مقاومت ویژه تصاویری از تغییرات مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی در اختیار قرار می‌دهند. برای تبدیل این تصاویر به تصاویر زمین‌شناسی، اطلاعاتی در خصوص مقادیر مقاومت ویژه انواع ساختارهای زیرسطحی و همچنین زمین‌شناسی محیط تحت بررسی حائز اهمیت است. مقاومت ویژه برخی از مواد، سنگ - ها، کانی‌ها و محیط‌های معمول زمین‌شناسی در جدول ۳-۱ آورده شده است. دامنه تغییرات مقاومت ویژه در مقایسه با کمیت‌های فیزیکی که در دیگر روش‌های ژئوفیزیک محاسبه می‌شوند بسیار بیشتر است. مقاومت ویژه الکتریکی مواد مختلف از $10^{-8} \Omega m$ برای نقره خالص تا $10^{16} \Omega m$ برای گوگرد خالص متغیر است [۴]. سنگ‌های دگرگون و آذرین نوعاً دارای مقادیر با مقاومت ویژه بالا هستند. مقاومت ویژه این سنگ‌ها اساساً وابسته به درجه شکستگی و درصد پرشدگی آنها از آب‌های زیرسطحی است. سنگ‌های رسوبی به علت

تخلخل و به واسطه آن محتوی آب بیشتر، معمولاً دارای مقاومت ویژه پایین می‌باشند [۲۳]. خاک‌های مرطوب و آب‌های زیرزمینی شیرین، دارای مقاومت ویژه پایینی هستند. خاک‌های رسی از انواع ماسه‌ای آن دارای مقاومت ویژه پایین تری می‌باشند. مقدار مقاومت ویژه آب دریا که برابر مقدار پایین ۰/۲ اهم-متر است، ناشی از میزان بالای نمک‌های محلول آن است. این مسأله مقاومت ویژه را به عنوان یک روش ایده‌آل برای آشکارسازی مرز آب‌های شور و شیرین در نواحی ساحلی مطرح می‌کند.

همان‌طور که در جدول ۱-۳ دیده می‌شود، مقاومت ویژه انواع سنگ‌ها و خاک‌ها دارای همپوشانی است. این مطلب از آنجا ناشی می‌شود که مقاومت ویژه نمونه‌های خاصی از خاک و سنگ وابسته به چندین عامل مختلف است. عوامل مؤثر در مقاومت ویژه الکتریکی آنها عبارت است از:

- (۱) حجم خلل و فرج موجود در سنگ و میزان شکستگی‌ها
- (۲) وضع قرار گرفتن خلل و فرج سنگ و چگونگی ارتباط آنها با یکدیگر
- (۳) حجمی از خلل و فرج سنگ که حاوی آب باشد
- (۴) قابلیت هدایت الکتریکی آب موجود در سنگ
- (۵) جنس کانی‌های تشکیل دهنده سنگ

بنابراین مقدار مقاومت ویژه الکتریکی یک لایه بستگی به وضعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه دارد. به عبارت دیگر تفکیک لایه‌ها برحسب جنس آنها از نظر زمین‌شناسی تنها با بدست آوردن مقاومت ویژه الکتریکی آنها میسر نمی‌باشد و مقاومت ویژه الکتریکی سازندها و سنگ‌های زمین‌شناسی موجود در هر منطقه باید به طور جداگانه تعیین شود.

جدول ۱-۳: مقاومت ویژه برخی از انواع آب، سنگ و رسوبات [۵]

مقاومت ویژه (اهم متر)	مواد معمول زمین‌شناسی
۵۰۰ - > ۱۰۰۰	آهک‌های آسماری
۲۰۰ - ۵۰۰	آهک‌های کرتاسه
۳۰۰ - ۱۰۰۰۰	ماسه سنگ کوارتزیت
۲۰ - ۱۰۰	خاکستر (برش) آتشفشانی

آب زیرزمینی	۱۰ - ۱۰۰
آب دریا	۰/۲
سنگ آهک	۵۰ - ۵۰۰۰
شیل	۲۰ - ۲۰۰۰
رس	۱ - ۱۰۰
آبرفت‌های دانه درشت و کنگلومرا	۳۰۰ - ۱۰۰۰۰
آبرفت‌های دانه متوسط	۱۰۰ - ۳۰۰
آبرفت‌های دانه ریز	۵۰ - ۱۰۰
شن و ماسه خشک	۱۰۰۰ - ۱۰۰۰۰
شن و ماسه اشباع از آب شیرین	۵۰ - ۵۰۰
شن و ماسه اشباع از آب شور	۰/۵ - ۵

۳-۱-۲- روش‌های اندازه‌گیری داده‌های مقاومت ویژه

داده‌های مقاومت ویژه به صورت یک بعدی، دو بعدی و همچنین سه بعدی اکتساب می‌شوند [۲۳]. یک عملیات یا برداشت ژئوالکتریک به یکی از دو روش سونداژزنی قائم الکتریکی (VES)^{۸۶} و یا پروفیل‌زنی^{۸۷} انجام می‌شود. در روش سونداژزنی، تغییرات عمقی یا قائم مقاومت ویژه مورد بررسی قرار می‌گیرد. اما در روش پروفیل‌زنی، تغییرات جانبی مقاومت ویژه مواد زیرسطحی در طول یک خط پروفیل بررسی می‌شود. در روش پروفیل‌زنی، آرایش مورد استفاده و پارامترهای آن، ثابت باقی می‌مانند و الکترودها در طول خط پروفیل جابه‌جا می‌شوند. برای نمایش داده‌های پروفیل‌زنی، محور افقی فواصل ایستگاهی و محور قائم مقادیر مقاومت ویژه را نشان می‌دهد. محور افقی همواره خطی است ولی محور قائم می‌تواند خطی یا لگاریتمی باشد.

در سونداژهای ژئوالکتریک، تغییرات عمقی مقاومت ویژه و لایه‌بندی‌های موجود، با استفاده از آرایش‌هایی که فاصله میان بعضی از الکترودها و یا همه آن‌ها به طور متقارن افزایش می‌یابد، بررسی می‌شوند. مقادیر مقاومت

^{۸۶} Vertical electric sounding

^{۸۷} Profiling

ویژه با توجه به فاصله و بر روی نمودارهای لگاریتمی (هر دو محور لگاریتمی) رسم می‌شوند. اگرچه روش‌هایی برای تفسیر شیب لایه‌ها نیز پیشنهاد شده، سونداژزنی ژئوالکتریک تنها در مواقعی که فصل مشترک لایه‌ها افقی باشد به خوبی جواب می‌دهد [۲۴].

در روش سونداژ الکتریکی موقعیت مرکز آرایش ثابت مانده و در هر مرحله، بسته به نوع آرایش، الکترودها نسبت به محل مرکز آرایش جابه‌جا شده و در فاصله مشخص دورتری قرار می‌گیرند. با انجام این عمل، جریان به اعماق پایین‌تر نفوذ کرده و می‌توان اطلاعاتی از لایه‌های در اعماق پایین‌تر به دست آورد.

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

در مواقعی که احتیاج به تهیه شبه مقاطعی از مقاومت ویژه توده‌های زیرسطحی است، داده‌ها به صورت دو بعدی برداشت می‌شوند.

۳-۱-۳- آرایش‌های الکترودی مورد استفاده

برای اندازه‌گیری‌های داده‌های مقاومت ویژه آرایش‌های الکترودی مختلفی پیشنهاد شده است. از مهم‌ترین آرایش‌هایی که در روش مقاومت ویژه بکار برده می‌شوند، می‌توان به آرایش‌های ونر^{۸۸}، شلومبرژه^{۸۹}، دوقطبی-دوقطبی^{۹۰}، قطبی-دوقطبی^{۹۱} و گرادیان^{۹۲} اشاره کرد. پرکاربردترین این آرایش‌ها، آرایش ونر، شلومبرژه و دوقطبی-دوقطبی می‌باشند [۲۳]. آرایش ونر در پروفیل‌زنی، آرایش شلومبرژه در سونداژزنی و آرایش دوقطبی-دوقطبی در تهیه شبه مقاطع و برداشت‌های IP محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند. در ادامه به توضیح دو آرایش مورد استفاده در این مطالعه می‌پردازیم.

⁸⁸ Wenner

⁸⁹ Schlumberger

⁹⁰ Dipole-dipole

⁹¹ Pole-dipole

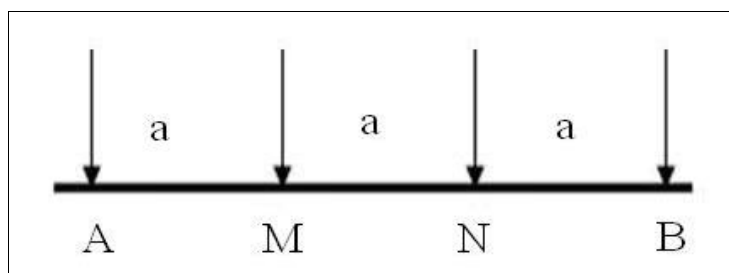
⁹² Gradient

۳-۱-۳-۱- آرایش وئر

در این آرایش، چهار الکتروود A، B، M و N در روی زمین در طول یک خط راست طوری قرار می گیرند که $AM = MN = NB = a$ باشد. A و B، الکتروودهای جریان و M و N، الکتروودهای پتانسیل هستند. این آرایش در شکل ۳-۲ به نمایش درآمده است. مقدار مقاومت ویژه برای این آرایش به صورت زیر محاسبه می شود [۴].

$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{I} \quad (۳-۲)$$

وقتی آرایش وئر در کاوش های عمقی بکار رود، الکتروودها نسبت به یک مرکز ثابت گسترش یافته و فاصله a به دفعات اضافه می شود. در کاوش های جانبی یا به نقشه درآوردن، فاصله a ثابت مانده و هر چهار الکتروود در امتداد یک خط حرکت می کنند. مقاومت ویژه ظاهری بدست آمده در این آرایش به مرکز آن نسبت داده می شود.



شکل ۳-۲: آرایش وئر

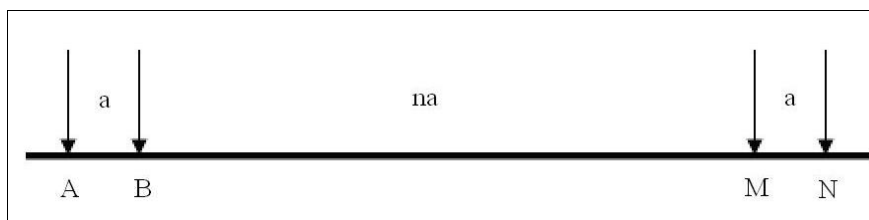
۳-۱-۳-۲- آرایش دوقطبی-دوقطبی

در این آرایش جفت الکتروودهای پتانسیل نزدیک یکدیگر و جفت الکتروودهای جریان نیز در مجاورت یکدیگر قرار گرفته اند. اما فاصله بین جفت الکتروودهای جریان و پتانسیل از یکدیگر بیشتر است. این آرایش دارای

انواع مختلفی است. در روش معمول، هر چهار الکتروود روی یک خط قرار می‌گیرند که به آن آرایش دوقطبی-دوقطبی محوری^{۹۳} می‌گویند. فاصله بین الکتروودهای پتانسیل از یکدیگر برابر با فاصله الکتروودهای جریان و برابر a می‌باشد (شکل ۳-۳).

فاصله میان دو الکتروود جریان و پتانسیل معمولاً ضریب صحیحی از a می‌باشد. مقاومت ویژه ظاهری در این آرایش به نقطه مرکز آرایش، نسبت داده شده و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲۳].

$$\rho_a = \pi n(n+1)(n+2)a\left(\frac{\Delta V}{I}\right) \quad (3-3)$$



شکل ۳-۳: آرایش دوقطبی-دوقطبی محوری

۲-۳- روش پلاریزاسیون القایی (IP)^{۹۴}

روش پلاریزاسیون (قطبش) القایی بطور گسترده‌ای در اکتشاف توده‌های کانسنگی و بالاخص سولفیدهای پراکنده و تا حدی در مطالعات آب‌های زیرزمینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برادران شلومبرژه از اولین کسانی بوده‌اند که این پدیده را شناخته و گزارش کرده‌اند. در استفاده از آرایش‌های چهار الکتروودی مرسوم مقاومت ویژه هنگامی که جریان الکتریکی تزریقی به زمین دفعته قطع می‌شود، عموماً اختلاف پتانسیل اندازه گیری شده مابین الکتروودهای پتانسیل دفعته به صفر نمی‌رسد بلکه پس از یک افت ناگهانی، از حالت پایدار به آهستگی رو به زوال می‌رود [۴،۹]. زمان واهلش (میرایی) این سیگنال در حدود چند ثانیه و حتی چند

¹ Axial Dipole- Dipole

⁹⁴ Induced polarization

دقیقه است. اگر جریان بین الکترودهای جریان دوباره برقرار شود، اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین الکترودهای پتانسیل پس از یک افزایش ناگهانی، در طول زمانی مشابه با زمان واهلش این ولتاژ به مقدار اولیه خود می‌رسد.

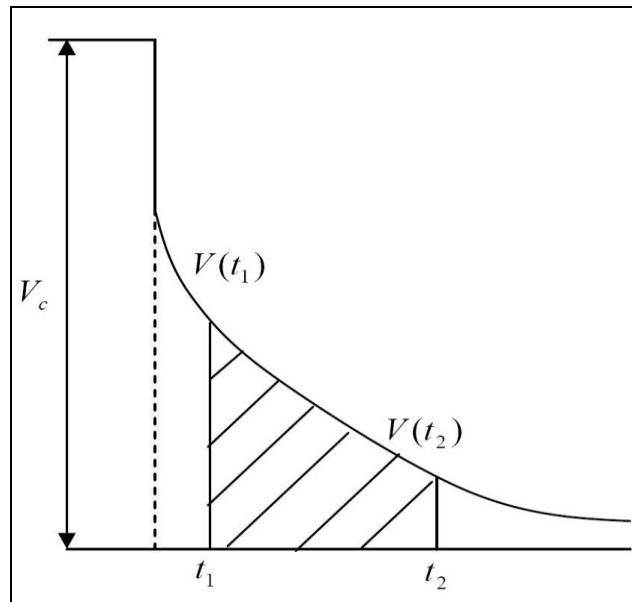
اندازه‌گیری‌های IP معمولاً در دو حوزه زمان و فرکانس صورت می‌پذیرد. در روش IP حوزه زمان که روش معمول اندازه‌گیری‌های IP در بررسی آب‌های زیرزمینی و رس‌ها است، اختلاف پتانسیل IP برحسب تابعی از زمان به روش‌های مختلف اندازه‌گیری می‌شود. در این روش از جریان‌های مستقیم و یا با فرکانس پایین برای تزریق جریان به درون زمین استفاده می‌شود. معمول‌ترین کمیت در اندازه‌گیری‌های IP حوزه زمان، اندازه‌گیری مقدار بارپذیری^{۹۵} است که توسط رابطه زیر محاسبه می‌شود [۴]:

$$M = \frac{1}{V_C} \int_{t_2}^{t_1} V(t) dt \quad (۴-۳)$$

در رابطه بالا M بار پذیری، V_C اختلاف پتانسیل بلافاصله بعد از قطع جریان و $V(t)$ ولتاژ رو به زوال IP در زمان‌های مختلف می‌باشد. در صورتی که $V(t)$ ، V_C دارای واحد یکسان باشند، مقدار بارپذیری برحسب میلی‌ثانیه خواهد بود.

آرایش‌های الکترودی مورد استفاده در اندازه‌گیری IP همان آرایش‌های مورد استفاده در روش مقاومت ویژه می‌باشند. ولی همان‌طور که ذکر شد برای تهیه شبه مقاطع IP به طور معمول از آرایش دوقطبی-دوقطبی استفاده می‌شود [۲۳]. از آنجا که دستگاه‌های IP معمولاً قابلیت اندازه‌گیری مقاومت ویژه را نیز دارا می‌باشند، در برداشت‌های IP معمولاً در هر ایستگاه برداشتی، داده‌های مقاومت ویژه نیز برداشت می‌شوند.

⁹⁵ Chargeability



شکل ۳-۴: انتگرال $V(t)$ در یک فاصله زمانی [۴].

۳-۲-۱- منشاء IP

ولتاژ رو به زوال IP ناشی از برانبارش انرژی در جسم در حین عبور جریان می‌باشد. این برانبارش انرژی از دو پدیده زیر نشأت گرفته است [۴]:

(۱) تغییر تحرک یون‌ها در مایعات موجود در خلل و فرج سنگ‌ها

(۲) تغییر در رسانندگی یونی و الکترونی در حضور کانی‌های فلزی

اثر اول به پلاریزاسیون غشایی^{۹۶} یا الکترولیتی و اثر دوم به پلاریزاسیون الکترودی یا ولتاژ اضافی^{۹۷} معروف است. مقدار پلاریزاسیون الکترودی معمولاً بزرگتر از پلاریزاسیون الکترولیتی بوده و به مقدار کانی‌های فلزی موجود در سنگ وابسته است. این دو اثر IP قابل تفکیک از یکدیگر نبوده و در اکتشاف کانی‌های فلزی، وجود پلاریزاسیون الکترولیتی، یک نوفه بر روی داده‌های اندازه‌گیری می‌باشد.

اغلب کانی‌های تشکیل دهنده سنگ دارای بار منفی در سطح تماس خود با شاره درون قسمت متخلخل سنگ می‌باشند. از این رو یون‌های مثبت درون شاره را به سمت خود جلب می‌کنند. تجمع یون‌های مثبت در مجاورت کانی‌ها معمولاً قشری به ضخامت یک میکرون (از سطح کانی به داخل شاره) بوجود می‌آورد. در

^{۹۶} Membrane

^{۹۷} Over voltage

صورتی که ضخامت این قشر در حدود قطر روزنه های ارتباطی قابل توجه باشد، از جابه جایی و حرکت یون ها به هنگام تزریق جریان جلوگیری می کند. یون های مثبت و منفی در دو طرف سد ایجاد شده تجمع یافته و تعادل قشرهای مثبت و منفی در سطح کانی ها به هم می خورد. در چنین شرایطی اگر جریان تزریقی به طور ناگهانی قطع شود، بعد از مدت زمانی کوتاه، یون ها برای رسیدن به تعادل پایدار به مکان های اول خود باز می گردند. این پدیده سبب ایجاد پلاریزاسیون غشایی و بواسطه آن ولتاژ رو به زوال IP می شود. پلاریزاسیون غشایی به ویژه در حضور کانی های رسی به سبب کوچک بودن خلل و فرج موجود در این نوع کانی ها، به خوبی دیده می شود [۴].

کانی ها و سنگ های مختلف مقادیر متفاوتی را در اندازه گیری های IP از خود نشان می دهند و آب های زیرزمینی دارای IP تقریباً صفر می باشند [۴، ۹]. از این رو در مطالعات آب های زیرزمینی با استفاده از روش مقاومت ویژه به دلیل نزدیک بودن مقاومت ویژه رس به آب های زیرزمینی، تفکیک آنها با مشکلاتی همراه و بعضاً غیر ممکن است. به این منظور با استفاده از روش پلاریزاسیون القایی می توان پاسخ رس ها (IP از نوع غشایی بالا) و آب های زیرزمینی (IP تقریباً صفر) از یکدیگر را تفکیک کرد.

فصل چهارم

اندازه‌گیری داده‌ها بر روی قنات آب

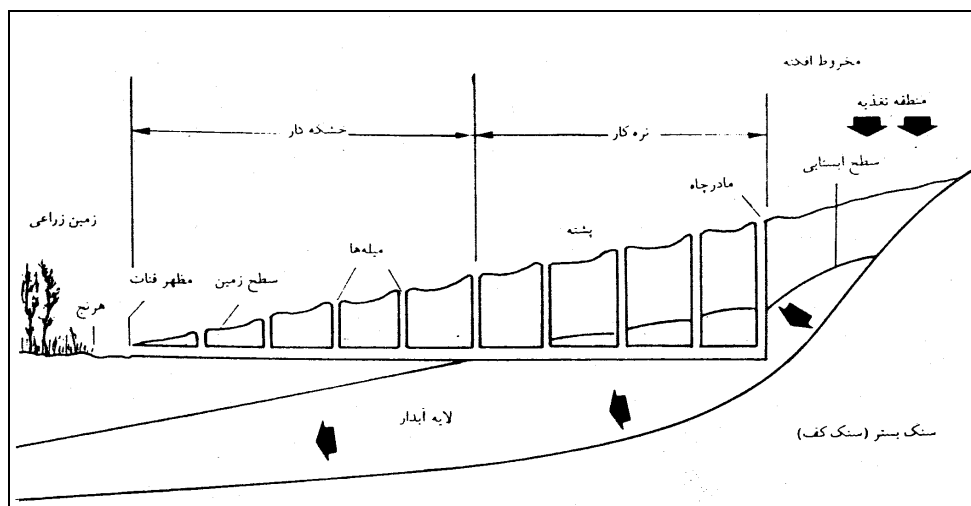
قنات یکی از راه‌های بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی است که از قدیم در کشور ما و برخی کشورهای دیگر مرسوم بوده و هم‌اکنون نیز یکی از راه‌های مهم بهره‌برداری از آب‌های زیرزمینی در کشور ما است. اولین

قنات‌ها در ایران و در حدود ۳۰۰۰ سال پیش ساخته شده‌اند. در کشور ما در حال حاضر سالانه در حدود ۷/۹ میلیارد متر مکعب از آب‌های زیرزمینی به وسیله ۲۸۷۹۴ رشته قنات استخراج می‌شود. این مقدار آب تقریباً ۱۶ درصد آبی است که سالانه از منابع زیرزمینی بهره برداری می‌شوند^{۹۸}[۷].

قنات عبارت است از یک مجرای آب زیرزمینی با شیب کم، همراه با تعدادی چاه قائم به نام میله که در زمین حفر می‌شوند [۷]. قنات‌ها را در رسوبات آبرفتی و به خصوص مخروط افکنه‌ها حفر می‌کنند. آب باران و آب‌های سطحی با نفوذ به درون رسوبات غالباً دانه درشت قسمت‌های بالای مخروط افکنه، مخازن آب زیرزمینی غنی موجود در آنها را تغذیه می‌کنند. قنات به کمک نیروی ثقل زمین آب سفره‌های زیرزمینی را زهکشی نموده و از طریق مجرای زیرزمینی ذکر شده به سطح زمین می‌رساند. بدین ترتیب آب زیرزمینی بدون نیاز به صرف انرژی در سطح زمین جریان می‌یابد. در زمان‌های دور که تنها انرژی موجود انرژی کار انسان و یا احشام بوده، قنات به مدد جریان دائمی خود دارای چنان ارزشی بوده که قیمتی برای آن متصور نبوده‌اند.

قنات از بخش‌های مختلفی تشکیل شده که در شکل ۴-۱ نمایش داده شده است. مجرای تقریباً افقی قنات، که پیشکار یا کوره نیز خوانده می‌شود، آب زیرزمینی را به طرف محل خروج یا مظهر قنات هدایت می‌کند. همان‌طور که در شکل ۴-۱ دیده می‌شود مجرای قنات از دو بخش درست شده است. در قسمتی از آن که تره‌کار نامیده می‌شود، کف مجرای قنات در زیر سطح ایستابی قرار دارد. این قسمت که بخش آبدۀ قنات را تشکیل می‌دهد، باعث زهکشی آب زیرزمینی و حرکت آن به سوی مظهر قنات می‌شود. خشکه‌کار بخشی از مجرای قنات است که از محل تقاطع مجرا با سطح ایستابی تا مظهر قنات ادامه دارد. بنابراین خشکه‌کار بالاتر از سطح ایستابی واقع شده و امکان تراوش آب از کف و دیواره‌های آن وجود دارد. در گذشته برای جلوگیری از هدر رفتن آب به درون زمین، معمولاً کف مجرا در این قسمت با ملاتی از آهک به نام شفته، پوشانده می‌شد [۱۰]. مجرای قنات دارای شیب کمی به طرف مظهر قنات است تا آب بتواند تحت نیروی گرانی در آن به حرکت درآید. البته شیب کف پیشکار قنات در بخش‌های مختلف متفاوت است و به شرایط محل نیز بستگی دارد. به همین جهت مقدار شیب از یک تا چند در هزار متغیر است [۱۰]. اما مقدار آن به طور تجربی طوری انتخاب می‌شود که ضمن انتقال آب با سرعت مناسب، باعث فرسایش شدید مجرای قنات و خرابی آن نگردد.

^۱ این آمار مربوط به سال ۱۳۷۱ می باشد



شکل ۴-۱: قسمت‌های مختلف قنات [۷].

طول مجرای قنات متفاوت بوده و از چند ده متر تا ده‌ها کیلومتر متغیر است و آن را از سمت مظهر قنات به سمت مادر چاه حفر می‌کنند [۷، ۱۰]. در حین حفر مجرای قنات، چاه‌های قائم یا میله‌هایی برای خارج کردن خاک‌های کنده شده و رساندن هوا به مقنی‌ها حفر می‌شود. وجود میله‌های قنات همچنین از نظر هدایت مسیر قنات از سطح زمین، رفت و آمد مقنی‌ها و لای‌روبی قنات ضروری است. مواد کنده شده را در اطراف دهانه چاه جمع می‌کنند و به صورت تپه‌های کوچکی در می‌آورند تا از ورود سیلاب‌ها و مواد خارجی به داخل آن جلوگیری کنند. این تپه‌های کوچک که از قرن‌ها پیش در روی چاه‌های قنات باقی مانده‌اند، از مناظر آشنای دشت‌های کشور ماست.

آخرین میله که عمیق‌ترین آنها است "مادر چاه" نامیده می‌شود که بیش از همه در زیر سطح ایستابی قرار گرفته است [۷، ۱۰]. در کف مادر چاه ممکن است کوره‌هایی در جهات مختلف برای افزایش آب‌دهی قنات حفر کنند. عمق مادر چاه بسته به عمق سطح ایستابی متفاوت است و از چند متر تا چند صد متر متفاوت است. گاهی برای افزایش آب‌دهی قنات در قسمت‌های بالا دست آن رشته‌هایی در جهات دیگر نیز حفر می‌شود. به این ترتیب قنات از چند رشته تشکیل می‌شود که همگی به یک مظهر ختم می‌شوند.

از آنجا که احداث یک قنات به انرژی و هزینه زیادی نیاز دارد، بنابراین حفاظت و نگهداری از آن بسیار حائز اهمیت است. در مناطقی که زمین سست و ریزشی است باید مجرای قنات توسط پوشش‌های مناسبی حفاظت

شود. این کار به روش‌های مختلف مثل سنگ چین کردن، آجر چین کردن و کول^{۹۹} گذاری انجام می‌شود [۷]. از دیگر فعالیت‌های مهم در نگهداری قنات‌ها بازدید دائمی و لای‌روبی رسوباتی است که توسط آب از بالا دست به سمت مظهر قنات آورده می‌شود. امروزه به علت هزینه‌های زیاد حفر قنات‌های جدید و هدر رفتن آب زیرزمینی توسط قنات‌ها در غیر فصل آبیاری و همچنین هزینه نگهداری قنات‌های قدیمی، حفر چاه و استفاده از پمپ‌هایی که با موتورهای دیزلی و یا الکتریکی کار می‌کنند، به تدریج جای قنات‌ها را می‌گیرد.

۴-۱- برداشت داده‌های GPR و مقاومت ویژه

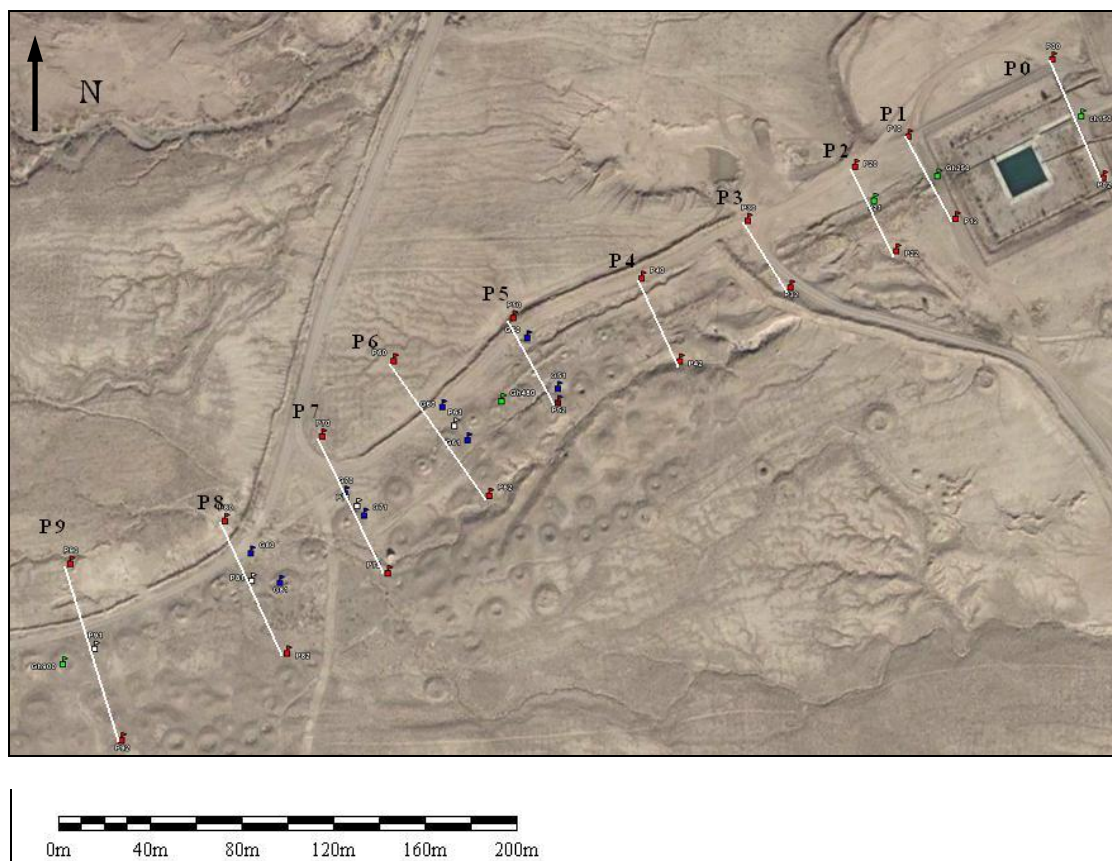
همان‌طور که قبلاً نیز ذکر شد، به طور کلی موفقیت روش‌های ژئوفیزیک وابسته به وجود تباین در مشخصه‌های فیزیکی اهداف زیرسطحی با محیط‌های دربرگیرنده آنها است. در محیط‌هایی که اهداف رسانای غیرعادی و یا مغناطیسی وجود نداشته باشد، کمیتی که پاسخ از این اهداف و آشکارسازی توسط روش GPR را سبب می‌شود، گذردهی دی‌الکتریک نام دارد [۳۷]. از این‌رو آب‌های زیر سطحی به دلیل داشتن گذردهی دی‌الکتریک بالا در مقایسه با رسوبات و سنگ‌های تشکیل دهنده پوسته فوقانی زمین [۱۲، ۲۶]، توسط روش GPR به خوبی قابل آشکارسازی می‌باشند. به همین ترتیب روش مقاومت ویژه به دلیل وجود تباین در مقاومت ویژه آب در مقایسه با رسوبات، از روش‌های معمول و موفق در اکتشاف آب‌های زیرسطحی است. بدین منظور پس از بازدید از مناطق مختلف، قناتی فعال انتخاب شد تا برداشت‌های مقاومت ویژه و GPR برای آشکارسازی و مقایسه نتایج دو روش مزبور بر روی آن صورت پذیرد.

از آنجا که در روش GPR از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا (در محدوده مگاهرتز) جهت بررسی‌های زیرسطحی استفاده می‌شود، هدف انتخاب شده بایستی در عمق کمی واقع باشد. بدین منظور قناتی انتخاب شد که به مظهر آن دسترسی وجود داشت و در نقاطی برای تطبیق اندازه‌گیری‌ها با نتایج، امکان اندازه‌گیری عمق آب وجود داشت. این قنات در ۱۸ کیلومتری شمال-شمال غربی شاهرود واقع است. برای انتخاب پروفیل‌های مناسب یک نقشه برداری ابتدایی توسط متر و کمپاس و GPS بر روی منطقه عملیاتی صورت گرفت. قنات در محدوده عملیاتی از سمت مادر چاه به سمت مظهر آن دارای امتداد تقریبی $N 60^{\circ} E$ می‌باشد. به منظور دستیابی به پاسخ‌های مناسب، پروفیل‌های برداشتی در راستای بیشترین تغییرات، یعنی عمود بر امتداد قنات

^۱ حلقه‌های پیش ساخته به شکل بیضی از جنس رس پخته، سیمان یا مواد دیگر. اخیراً از انواع بتنی نیز استفاده می‌شود.

انتخاب شدند. بدین ترتیب پروفیل‌ها دارای آزمون 150° می‌باشند. با ثبت نقاط ابتدا و انتهای پروفیل‌ها توسط GPS، موقعیت آنها بر روی عکس هوایی منطقه برداشت، مشخص شده و در شکل ۴-۲ نمایش داده شده است. خطوط سفید رنگ بر روی شکل ۴-۲ نشان دهنده پروفیل‌های برداشت بوده و نقاط قرمز رنگ، نقاط ابتدا و انتهای پروفیل‌ها می‌باشند. در پروفیل‌های ابتدایی که طول آنها کوتاه‌تر بوده است، پروفیل‌های GPR و مقاومت ویژه دارای طول یکسان می‌باشند. در پروفیل‌های بزرگتر به دلیل محدودیت دستگاه GPR مورد استفاده در توپوگرافی‌های ناهموار، طول این پروفیل‌ها یکسان نبوده و از نشانگرهای آبی رنگ برای نشان دادن ابتدا و انتهای پروفیل‌های GPR استفاده شده است.

طرح مربع شکل تیره رنگ در شکل ۴-۲ استخری را نشان می‌دهد که به منظور ذخیره آب برای مقاصد کشاورزی پایین‌تر از مظهر قنات، تعبیه شده و ابعاد آن در حدود ۲۵ متر می‌باشد. مربع بزرگتر در اطراف این استخر و مظهر قنات که به ابعاد ۷۵ متر می‌باشد، حفاظ‌های فلزی را نشان می‌دهد که برای جلوگیری از آلوده شدن آب توسط عوامل خارجی نصب شده‌اند. بعد از مظهر قنات، آب توسط یک کانال زیرزمینی به سمت شهر هدایت می‌شود. این کانال در ضلع شمال شرقی حفاظ‌های فلزی واقع شده است. همان‌طور که از عکس هوایی در شکل ۴-۲ دیده می‌شود، ۹ پروفیل بر روی قنات و یک پروفیل بر روی کانال آب انتخاب شد. پروفیل بر روی کانال انتقال آب را پروفیل صفر و پروفیل‌های بر روی قنات آب به ترتیب از سمت مظهر قنات به سمت مادر چاه از ۱ تا ۹ نامگذاری شدند. این پروفیل‌ها در شکل ۴-۲ به ترتیب از P0 تا P9 مشخص شده‌اند. به غیر از مظهر قنات در دو نقطه از مسیر قنات امکان اندازه‌گیری سطح آب از طریق میله‌های بدون درپوش قنات وجود داشت. یکی از این نقاط مابین پروفیل‌های ۵ و ۶ و دیگری بالاتر از پروفیل ۹ واقع است که با نشانگرهای سبز رنگ بر روی شکل ۴-۲ نشان داده شده است. سطح آب قنات در این نقاط به ترتیب در عمق‌های ۴/۸۰ و ۹ متر واقع است. با توجه به عمق قنات در مظهر آن که در حدود ۲ تا ۲/۵۰ متر است و شیب یکنواخت دشت در محل برداشت امکان درون‌یابی عمق قنات آب در محل پروفیل‌های برداشت با تقریب خوبی امکان‌پذیر است. مظهر قنات نیز با نشانگر سبز رنگ در مرکز پروفیل ۱ مشخص می‌باشد. با توجه به برداشت‌های GPS صورت گرفته در طول پروفیل‌های ذکر شده، سطح زمین از توپوگرافی همواری برخوردار بوده و به همین لحاظ نیازی به اعمال تصحیحات توپوگرافی بر روی داده‌های GPR و مقاومت ویژه نمی‌باشد.



شکل ۴-۲: عکس هوایی از محل برداشت داده‌ها، به همراه پروفیل‌های برداشت و نقاط برداشت GPS [۴۲].

داده‌های مقاومت ویژه توسط دستگاه Terrameter SAS1000 ساخت شرکت سوئدی ABEM و داده‌های GPR توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شدند. آنتن مورد استفاده برای اکتساب داده‌های GPR، آنتن پوششی^{۱۰۰} با فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز می‌باشد. دستگاه از دو آنتن مجزا که درون یک محفظه فایبرگلاس قرار گرفته‌اند، بهره می‌برد. فاصله این آنتن‌ها برابر ۰/۲۷۹۴ متر، ثابت می‌باشد [۳۳]. دستگاه GPR توسط یک وسیله یدک می‌شود. این وسیله دارای یک کیلومتر شمار با دقت بسیار بالا می‌باشد. با یدک شدن و حرکت دستگاه توسط این وسیله، کیلومتر شمار در فواصل مکانی معین دستگاه GPR را بکار انداخته و داده‌ها برداشت می‌شوند. از این رو سرعت برداشت داده‌های GPR بسیار بالا بوده و اندازه‌گیری در هر پروفیل کمتر از ۵ دقیقه صورت پذیرفت. به منظور افزایش دقت و همچنین صحت اندازه‌گیری‌ها کیلومتر شمار در ابتدای برداشت داده‌ها کالیبره شد. داده‌های برداشت شده در حافظه نمایشگر دستگاه (DVL)^{۱۰۱} ذخیره شده و توسط نرم افزار WinPXFER با پسوند DT1 به کامپیوترهای شخصی انتقال

¹⁰⁰ Shielded

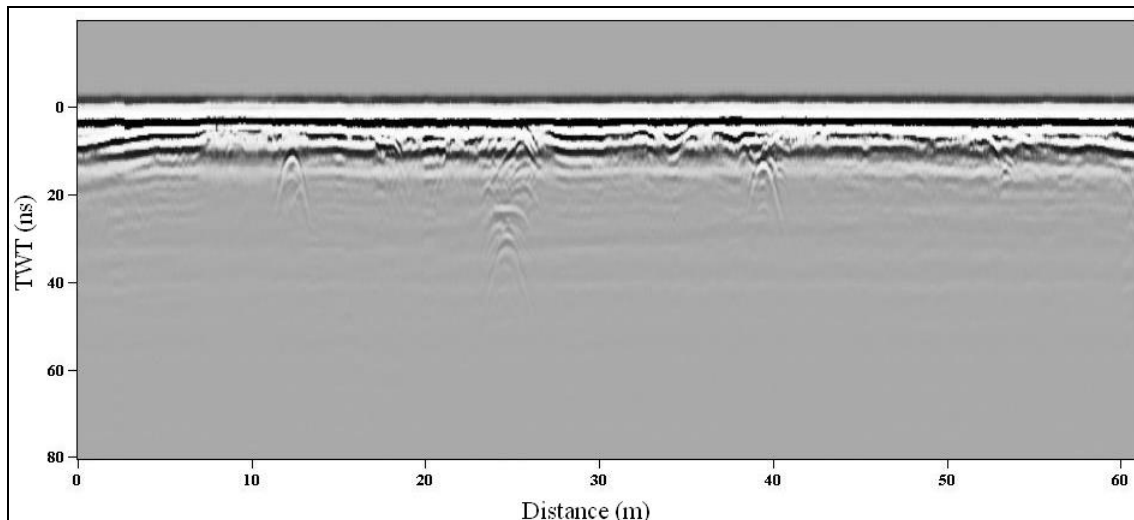
¹⁰¹ Digital video logger

می‌یابند تا توسط نرم افزارهای مختلف برای نمایش و پردازش آنها اقدام گردد. همراه با داده‌های ذخیره شده، یک‌سری اطلاعات مربوط به دستگاه و داده‌های برداشت شده با پسوند HD به حافظه کامپیوتر انتقال می‌یابد. این اطلاعات توسط نرم افزارهای ویرایش متن نظیر Notepad قابل بازخوانی است. این اطلاعات شامل فرکانس آنتن مورد استفاده، طول پنجره زمانی، فواصل ایستگاه‌ها، فاصله آنتن‌ها، تعداد ردهای دسته شده، فواصل نمونه‌گیری، شیوه برداشت و برخی اطلاعات دیگر نظیر تاریخ برداشت داده‌ها در این فایل ذخیره می‌شود. دانستن و تصحیح این اطلاعات در صورت لزوم به منظور به‌کارگیری برخی از پردازش‌ها که از این اطلاعات بهره می‌برند، بسیار حائز اهمیت است. اطلاعات مربوط به پردازش‌های به‌کار رفته بر روی داده‌ها، بعد از انتقال آنها به کامپیوتر نیز به صورت اتوماتیک در این فایل‌ها ذخیره می‌شود.

۴-۲- اندازه‌گیری بر روی مرزهای ناگهانی

پروفیل اول برداشت به طول ۶۰ متر بر روی کانال آبی که به منظور انتقال آب قنات به داخل شهر تعبیه شده، در نظر گرفته شد. همان‌طور که ذکر شد این پروفیل را پروفیل صفر نام‌گذاری کردیم. کانال آب در ۲۴/۵ متری از طول این پروفیل واقع است. اندازه‌گیری داده‌های GPR با فواصل ایستگاهی ۵ سانتیمتر و از آنجا که هدف در عمقی کمتر از دو متر واقع است، پنجره زمانی را برابر ۱۰۰ نانو ثانیه در نظر گرفتیم. برای حذف نوفه‌های تصادفی محیطی و همچنین عدم بالا بردن زمان برداشت، تعداد دسته^{۱۰۲} ردها را برابر مقدار پایین ۱۶ رد در نظر گرفتیم.

شکل ۴-۳ مقطع زمانی داده‌های GPR مربوط به پروفیل صفر از منطقه مورد مطالعه می‌باشد. این مقطع با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک، توسط نرم افزار Win-Ekko Pro [۳۳]، بدست آمده است. برای نمایش این مقطع از نرم افزار Transform [۱۶]، استفاده شده است. در پیوست‌های الف و ج، این نرم‌افزارها و قابلیت آنها به اختصار توضیح داده شده است.



شکل ۴-۳: مقطع زمانی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک

دستگاه‌های GPR در واقع زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند. برای تعیین موقعیت مکانی رویدادها، این زمان‌ها بایستی به عمق تبدیل شوند. برای تبدیل مقطع زمانی به مقطع عمقی GPR، بایستی اطلاعات دقیقی نسبت به سرعت امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی، در اختیار باشد. بدین منظور بایستی سرعت متوسطی از ساختارهای زیرسطحی در اختیار باشد. سرعت امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی بایستی در هنگام برداشت داده‌ها و در محل برداشت صورت پذیرد. در استفاده از دستگاه Noggin Plus، سه راه برای تخمین سرعت وجود دارد که عبارتند از [۳۰]:

(۱) استفاده از شکل هذلولی‌های پراش که در مقاطع GPR دیده می‌شوند

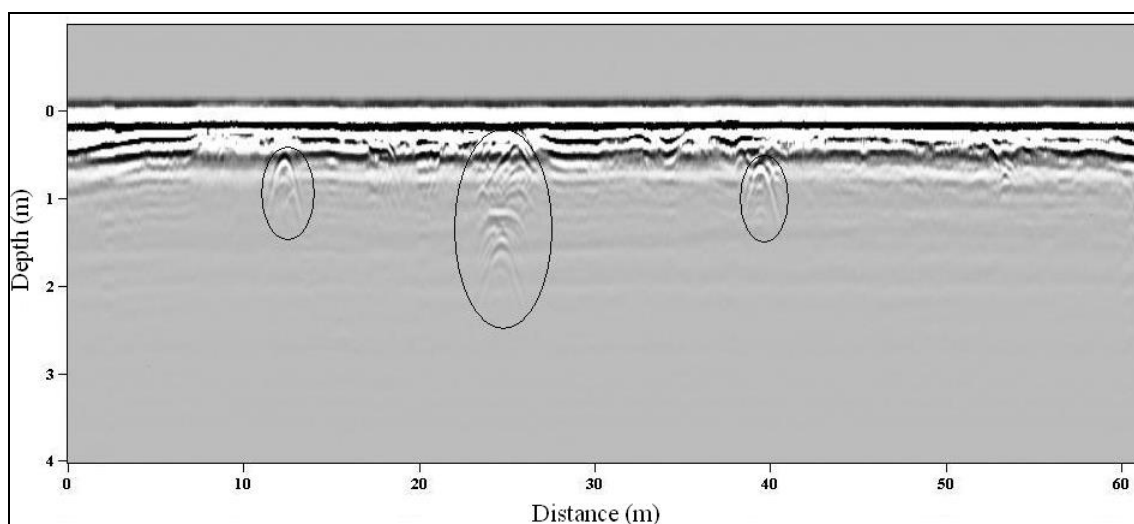
(۲) استفاده از اهداف مدفون در عمق معین

(۳) تخمین سرعت در توده‌های زیرسطحی با توجه به محیط مورد بررسی

در صورتی که هذلولی‌های پراش در هنگام برداشت داده‌ها در نمایشگر GPR مشخص باشند، سرعت متوسط قابل محاسبه است. اهداف مجزا^{۱۰۳} و نقطه‌ای (در مقایسه با طول موج GPR) نظیر تخته سنگ‌ها و قلوه سنگ‌ها سبب ایجاد هذلولی‌های پراش در مقاطع GPR می‌گردند. همچنین اهداف خطی نظیر لوله‌ها و کابل‌های مدفون در خاک در صورتی که خطوط برداشت بر راستای آنها عمود باشد، چنین آثاری را سبب می‌شوند [۴۱، ۱۲].

در استفاده از شکل هذلولی‌های پراش ناشی از اهداف خطی (نظیر کابل‌ها و لوله‌ها) بایستی توجه داشت که خطوط برداشت عمود بر راستا و امتداد چنین اهدافی واقع باشند. در صورتی که چنین شرایطی برقرار نباشد سرعت در ساختارهای زیر سطحی بیشتر تخمین زده شده و اهداف زیرسطحی عمیق‌تر از عمق واقعی‌شان دیده می‌شوند [۱۲].

با توجه به وجود هذلولی‌های مشخص در این پروفیل و با استفاده از برازش هذلولی مدل با هذلولی ناشی از اهداف زیر سطحی (هذلولی مدل با انتخاب گزینه‌های مناسب در حین برداشت داده‌ها بر روی صفحه نمایشگر فعال می‌شود)، سرعت در محیط زیرسطحی برابر ۰/۱ متر بر نانوثانیه به دست آمد. با استفاده از سرعت بدست آمده مقطع عمقی داده‌های GPR (شکل ۴-۴) حاصل شد.



شکل ۴-۴: مقطع عمقی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک

در صورتی که عمق اهداف زیرسطحی در مقایسه با فاصله آنتن‌ها بزرگ‌تر باشد، با استفاده از رابطه زیر با تقریب خوبی عمق آن قابل تخمین است [۳۰، ۱۲].

$$D = \frac{Vt}{2} \quad (۴-۱)$$

در رابطه بالا D عمق هدف، t زمان متناظر آن در مقطع زمانی و V سرعت متوسط تا هدف در محیط زیرسطحی است.

کانال آب در ۲۴/۵ متری از ابتدای پروفیل و در عمق تقریبی ۱ متری واقع است. همان‌طور که در شکل ۴-۴ دیده می‌شود، هذلولی‌های پراش در ۲۴/۵ متری از پروفیل که با بیضی بزرگ در مرکز شکل مشخص‌اند، مؤید بازتاب امواج از فصل مشترک‌های مختلف می‌باشند. در این قسمت حداقل، فصل مشترک‌های زیر قابل تشخیص است، که به ترتیب از سطح به سمت عمق زمین عبارتند از: فصل مشترک خاک- بتن^{۱۰۴}، بتن- هوا، هوا- آب، آب- بتن و در نهایت بتن و خاک مرطوب. توان بازتاب از فصل مشترک‌های مختلف به اندازه منطقه گذار وابسته است [۱۲، ۲۵]. لازم به یادآوری است که، منطقه گذار فاصله‌ای است که در آن ضریب گذردهی (ϵ_r) تغییر می‌کند. در تمامی این مرزها این تغییر ناگهانی است و بازتاب امواج را به خوبی سبب می‌شود. مسئله دیگری که بایستی مد نظر قرار گیرد، قدرت تفکیک قائم GPR در این لایه‌ها است. با در نظر گرفتن طیف فرکانس امواجی که در گیرنده دریافت می‌شوند و از روی آن محاسبه فرکانس مرکزی بازگشتی، این کمیت قابل تخمین است. این کمیت به شدت وابسته به سرعت امواج در محیط زیرسطحی است، با توجه به سرعت بالای امواج در هوا، فاصله دو بازتاب از فصل مشترک‌های بتن- هوا و هوا- آب بسیار نزدیک به هم بوده و باعث تداخل این امواج در یکدیگر می‌شود. قطبیت^{۱۰۵} این بازتاب‌ها به علت تغییر سرعت در جهت عکس روی این مرزها، با یکدیگر متفاوت است. ولی موج بازتابیده از سطح آب به علت تباین شدید در گذردهی نسبی آن با هوا بزرگتر بوده و باعث می‌گردد که به عنوان پدیده غالب دیده شود. این مسئله در مورد آب کاملاً بالعکس بوده و سرعت پایین امواج GPR در آب احتمال آشکارسازی بتن زیر آب را با وجود عمق کم آب، ممکن می‌سازد. البته در اینجا نباید نقش اتلاف کم امواج در عبور از لایه‌های مورد بررسی را فراموش کرد (آب شیرین و هوا جزء مواد کم اتلاف می‌باشند [۱۲]). در ۲۴/۵ متری از پروفیل بی‌هنجاری‌های بسیاری دیده می‌شود. در بین این بی‌هنجاری‌ها احتمال وجود چندگانه^{۱۰۶} ها در نواحی کم اتلاف و همچنین وجود بازآوایش^{۱۰۷} در هوای درون کانال نیز وجود دارد. پدیده بازآوایش از بازتاب مکرر امواج درون منطقه کم اتلاف هوا ناشی شده و در مقطع زمانی به صورت یکسری از پالس‌های با دامنه بالا دیده می‌شود [۲۱]. از آنجا که پدیده بازآوایش به صورت بارزی در این قسمت از پروفیل دیده نمی‌شود، می‌توان حدس زد که ابعاد ناحیه بالای کانال که از هوا تشکیل یافته، در مقایسه با طول موج فرکانس مرکزی GPR در هوا (در حدود ۱/۲ متر) کوچک می‌باشد [۲۱]. با توجه به مقدار آبدهی این قنات و مقدار آبی که این کانال انتقال می‌دهد، بعید به

^{۱۰۴} با توجه به اینکه اطلاعاتی از مصالح به‌کاربرده شده برای ساخت این کانال در دست نیست از واژه بتن استفاده کرده‌ایم.

¹⁰⁵ Polarity

¹⁰⁶ Multiple

¹⁰⁷ Reverberation

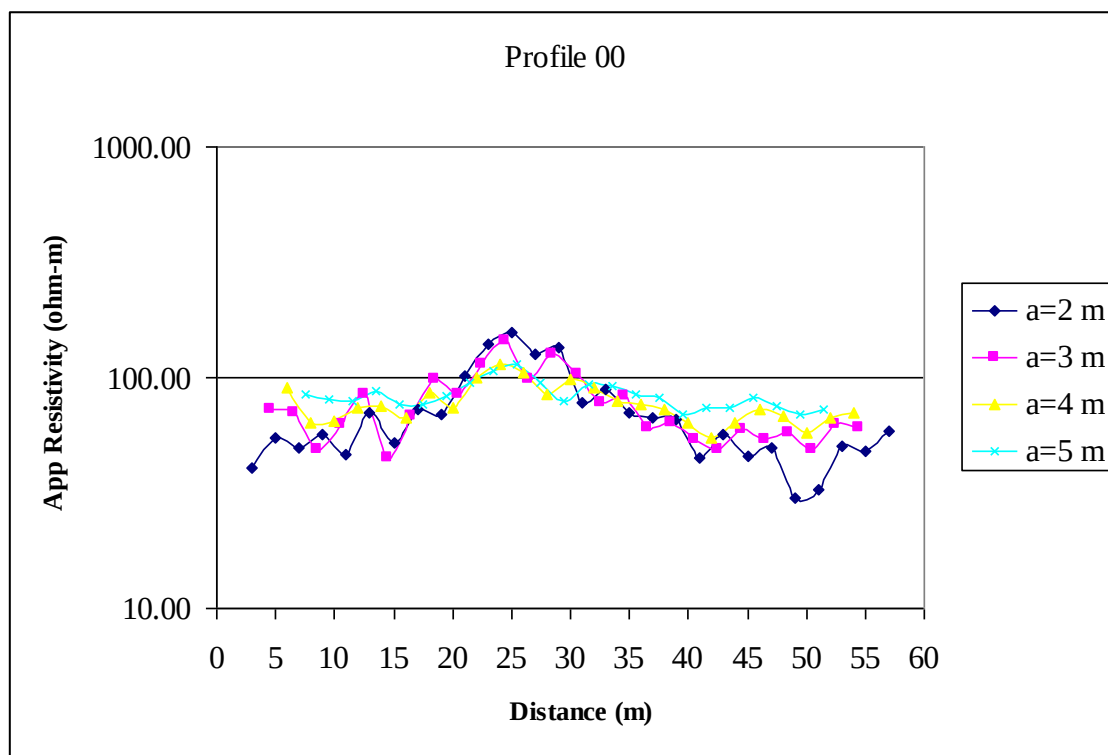
نظر می‌رسد که برای انتقال این مقدار آب، چنین کانالی در این منطقه تعبیه شده باشد. لذا نتیجه بدست آمده در بالا، نتیجه‌ای منطقی است. از آنجا که اطلاعات در خصوص ابعاد، هندسه و مصالح به کار رفته برای ساخت این کانال بسیار محدود بوده و تنها از یک آنتن با فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز در این مطالعه استفاده شده است، بررسی‌های جزئی‌تر و همچنین نسبت دادن هر یک از این بی‌هنجاری‌ها به فصل مشترکی خاص، کاری غیرمنطقی است. دو پدیده دیگری که در شکل ۴-۴ به چشم می‌خورند، وجود هذلولی‌های پراش در ۱۳ و ۴۰ متری پروفیل می‌باشد. این بی‌هنجاری‌ها با بیضی‌های کوچک‌تر در شکل مشخص شده‌اند. این پاسخ‌ها از لوله‌های بتنی به قطر ۵۰ سانتیمتر و مدفون در عمق تقریبی ۷۰ سانتیمتری نشأت گرفته‌اند. از آنجا که درون این لوله‌ها مملو از هوا است، و به دلیل قطر نسبتاً پایین لوله‌ها و فرکانس مورد استفاده، پاسخ‌های ناشی از فصل مشترک‌های بالا و پایین لوله‌ها در زمان بسیار نزدیک هم بوده و به راحتی قابل آشکارسازی نمی‌باشند. این امر از سرعت بالای امواج GPR در هوا ناشی می‌شود. لوله‌ها به منظور انتقال آب برای مقاصد کشاورزی تعبیه شده و در زمان برداشت داده‌ها فاقد آب بوده‌اند.

برداشت‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ورنر و با فواصل میان الکترودی (طول آرایه) ۲، ۳، ۴ و ۵ متر، بر روی پروفیل صفر انجام شد. این پروفیل‌ها به صورت نیمه لگاریتمی در شکل ۴-۵ به نمایش درآمده‌اند. همانطور که از روی این پروفیل‌ها دیده می‌شود، مجموعه هوا، بتن و آب موجود در کانال (واقع در ۲۴/۵ متری پروفیل) در مقایسه با خاک اطراف آن که دارای رسانندگی بالا یا مقاومت ویژه پایین است، به صورت توده‌ای مقاوم دیده می‌شود. مقاومت ویژه پایین خاک از وجود رس فراوان موجود در خاک نشأت گرفته است. اثر لوله بتنی در فاصله ۱۳ متری به خوبی بر روی پروفیل‌های مقاومت ویژه با فواصل میان الکترودی ۲ و ۳ متر دیده می‌شود، در صورتی که اثری از لوله‌ای به همین ابعاد و در عمق یکسان در فاصله ۴۰ متری از طول پروفیل مشاهده نمی‌شود. شواهد امر نشان می‌دهد از لوله واقع در فاصله ۱۳ متری مدت‌ها است که آبی عبور نکرده، ولی از لوله واقع در ۴۰ متری برای آبرسانی به زمین‌های کشاورزی، به تناوب استفاده شده است. مرطوب بودن لوله و خاک اطراف آن باعث تعدیل مقاومت ویژه بالای هوا در فاصله ۴۰ متری و عدم وجود پاسخ از لوله بتنی در این مکان می‌باشد.

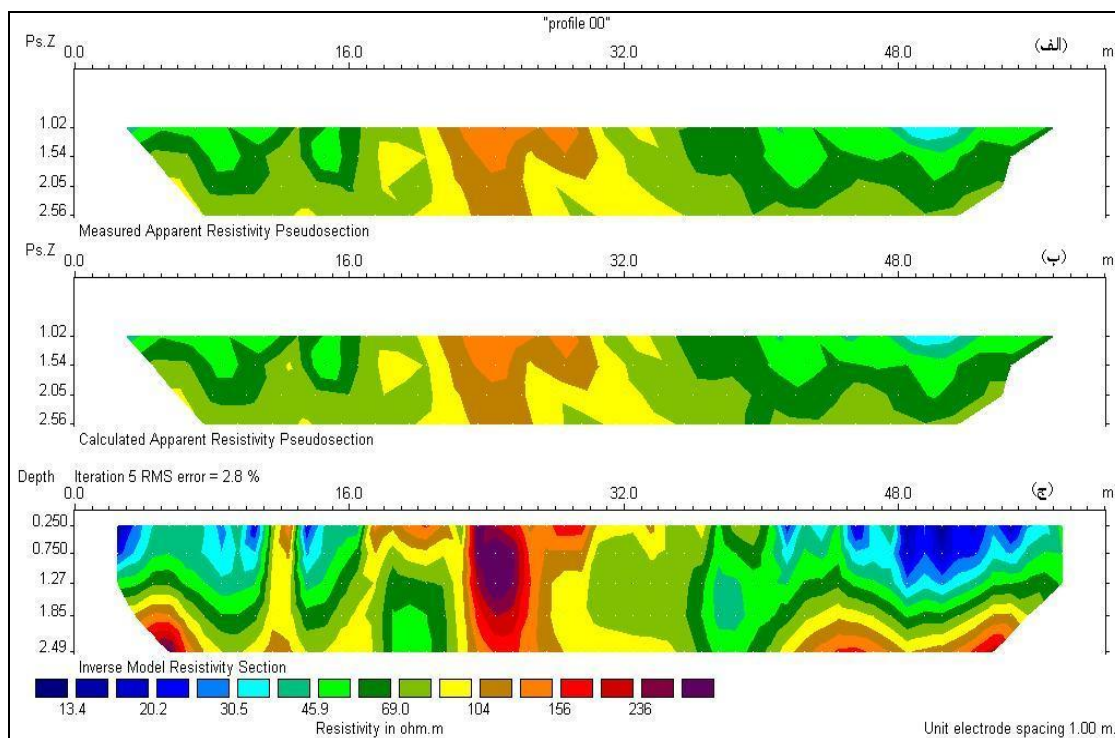
در شکل ۴-۶، شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون (معکوس) مربوط به این پروفیل که با استفاده از نرم افزار Res2dinv به دست آمده، نشان داده شده است. همان‌طور که در مقطع دو بعدی حاصل از مدل سازی وارون دیده می‌شود (شکل (ج))، کانال آب در موقعیت ۲۴/۵ متری به صورت

توده‌ای مقاوم در مقایسه با خاک اطراف آن به نقشه درآمده است. همانطور که قبلاً هم ذکر شد، خاک اطراف کانال آب دارای رس بالا و لذا مقاومت ویژه پایین می‌باشد. این مطلب مؤید نتایج مذکور در بالا در خصوص شکل ۴-۵ می‌باشد. در ۱۳ متری پروفیل، اثر لوله بتنی به صورت یک منطقه با مقاومت ویژه بالا از سطح تا عمق گسترش یافته است. این مطلب تأکیدی بر قدرت تفکیک بالای روش GPR در مقایسه با روش مقاومت ویژه (برداشت شده با آرایش و نر) می‌باشد.

با توجه به شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ مقاومت ویژه زمین اطراف کانال آب، بسیار پایین است. مقاوت ویژه زمین، نقش به‌سزایی در نفوذ امواج GPR درون زمین ایفا می‌کند [۳۷]. همان‌طور که از مقطع عمقی GPR در شکل ۴-۴ دیده می‌شود، امواج GPR پاسخی از عمق‌های بیشتر از ۲ متر نشان نمی‌دهند. این مطلب ناشی از مقاومت ویژه پایین یا رسانندگی بالای زمین در منطقه برداشت می‌باشد. دلیل نفوذ بیشتر امواج در ۲۴/۵ متری از پروفیل، عبور از ساختارهای کم اتلاف نظیر هوا و آب شیرین و حتی وجود چندگانه‌ها می‌باشد.



شکل ۴-۵: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل صفر.



شکل ۴-۶: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل صفر. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل‌سازی وارون (ج).

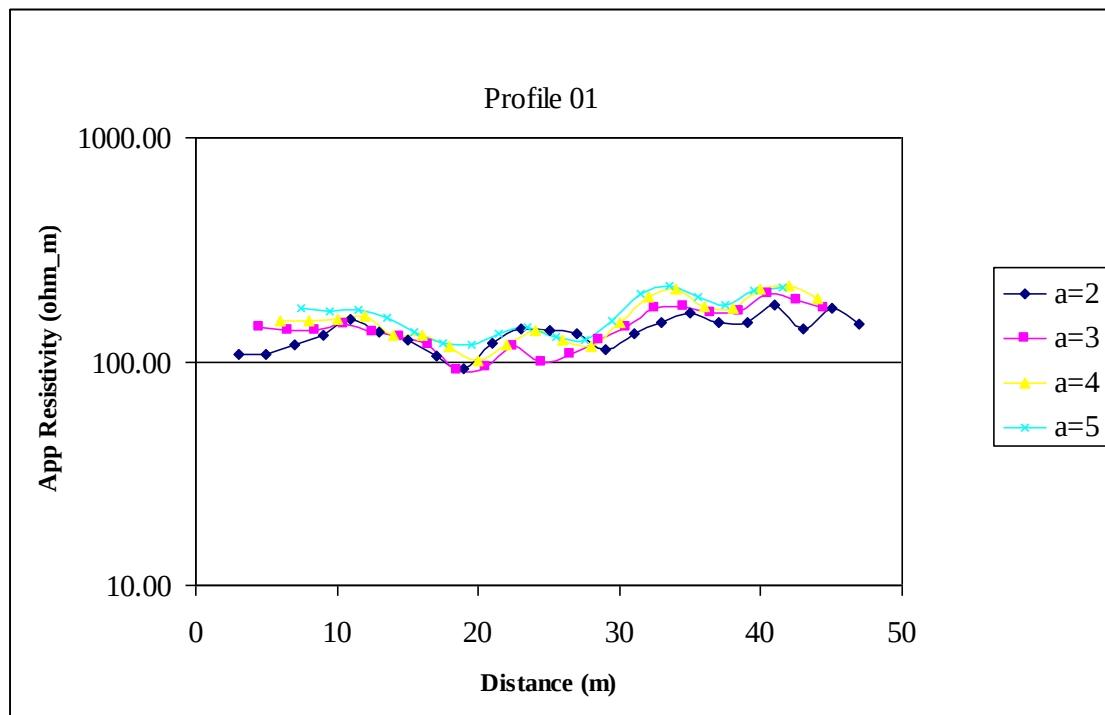
۴-۳- اندازه‌گیری بر روی پروفیل‌های ابتدایی

۴-۳-۱- اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه

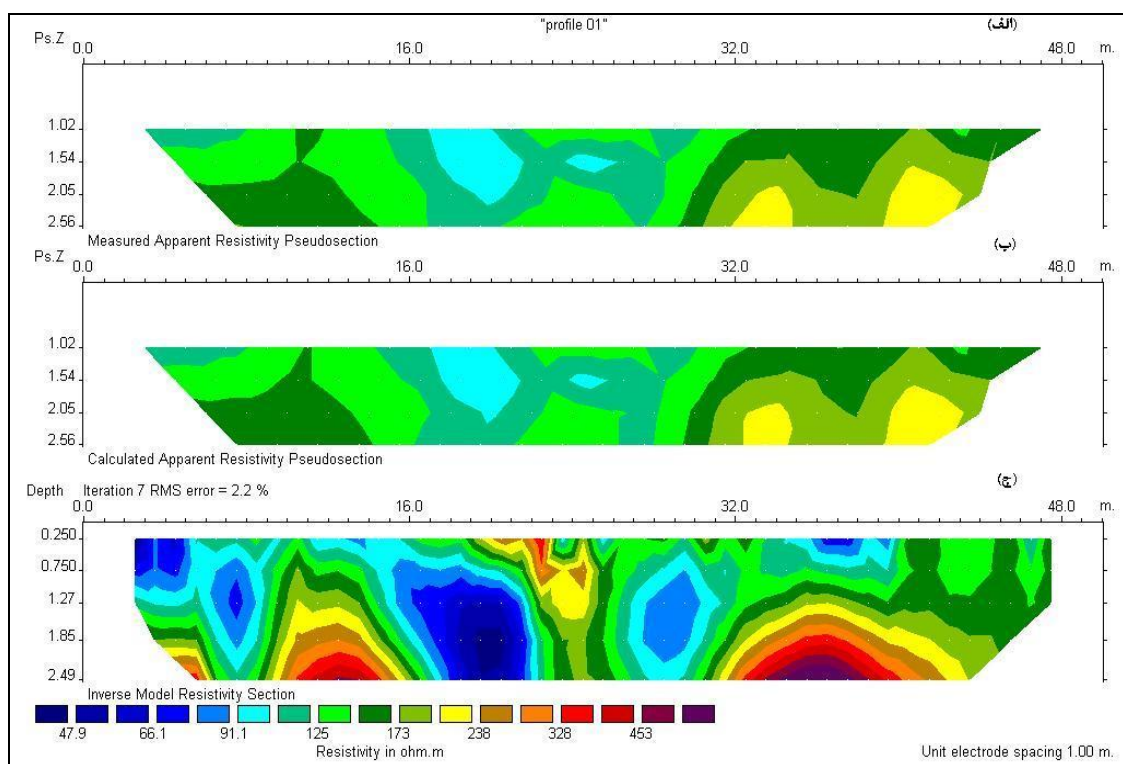
پروفیل ۱ به فاصله ۵ متر از مظهر قنات و به طول ۵۰ متر عمود بر روی قنات آب در نظر گرفته شد. مجرای قنات آب در محل این پروفیل در عمق ۲ تا ۲/۵ متری و در فاصله ۲۴/۵ متری از ابتدای طول پروفیل واقع است. برداشت‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر و با فواصل میان الکترودی ۲، ۳، ۴ و ۵ متر بر روی این پروفیل صورت گرفت.

در شکل ۴-۷ پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری برداشت شده بر روی این پروفیل به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف در یک نمودار نیمه لگاریتمی نمایش داده شده است. تمامی پروفیل‌ها در شکل ۴-۷ در محل عبور مجرای قنات مقاومت ویژه بالاتری نسبت به اطراف خود نشان می‌دهند. این اثر را می‌توان به وجود کول‌های بتنی و همچنین وجود هوای بالای سطح آب قنات، که هر دو دارای مقاومت ویژه بالایی در مقایسه با خاک اطراف (حاوی رس نسبتاً بالا و در نتیجه مقاومت ویژه پایین) هستند، نسبت داد. پروفیل‌های با طول آرایه بیشتر یک روند افزایش مقاومت ویژه نسبت به عمق را نشان می‌دهند. این اثر احتمالاً به دلیل وجود رس نسبتاً بالا در طبقات فوقانی خاک (روباره رسانای رسی) و وجود رس کمتر در طبقات پایینی خاک، بوجود آمده است. اثر کاهش مقاومت ویژه در اطراف قنات آب را می‌توان به نشت آب قنات به اطراف و همچنین اثر روباره‌های محلی رسانا و خاک ناشی از لای‌روبی متناوب قنات که حاوی رس نسبتاً فراوانی است، نسبت داد. البته نقش خاصیت مویینگی آب در این خاک با میزان رس بالا را نباید نادیده گرفت.

با توجه به پروفیل‌های مقاومت ویژه در شکل ۴-۷، روباره خاک در منطقه برداشت از مقاومت ویژه پایینی برخوردار است. از آنجا که آب درون قنات از ابعاد کمی در مقایسه با عمق آن برخوردار است و با توجه به نزدیک بودن مقاومت ویژه آب به خاک اطراف آن، روش مقاومت ویژه در آشکارسازی آب قنات موفق نبوده و تنها بتن و هوای با مقاومت ویژه بالا را در مقایسه با رسوبات با مقاومت ویژه پایین به نقشه درآورده است. شکل ۴-۸ شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به این پروفیل را نشان می‌دهد. مقطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها (شکل ۴-۸ ج) نیز دو منطقه با مقاومت ویژه پایین را در دو طرف قنات نشان می‌دهد.



شکل ۴-۷: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۱.



شکل ۴-۸: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه پروفیل ۱. شبه مقطع داده های مقاومت ویژه اندازه گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

به فاصله حدودی ۵ متر از ابتدای پروفیل ۱، خاک برداری قابل توجه از منطقه برداشت سبب شده تا یک مقطع قائم از خاک منطقه تا عمق تقریبی ۲/۸ متر به وضوح قابل مشاهده باشد. این مقطع عمود بر پروفیل‌های انتخابی بوده و در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که خاک در این مقطع دارای میزان رس بالایی است. به دلیل وسعت نسبتاً قابل ملاحظه رسوبات رسی در محل، می‌توان گفت که منطقه موئینه از گسترش قابل توجهی برخوردار است. این اثر می‌تواند پاسخ‌های هوا و بتن درون مجرای قنات را که دارای مقاومت ویژه بالایی هستند تحت تأثیر قرار داده و بدین سبب آشکارسازی آنها به خوبی صورت نگیرد.

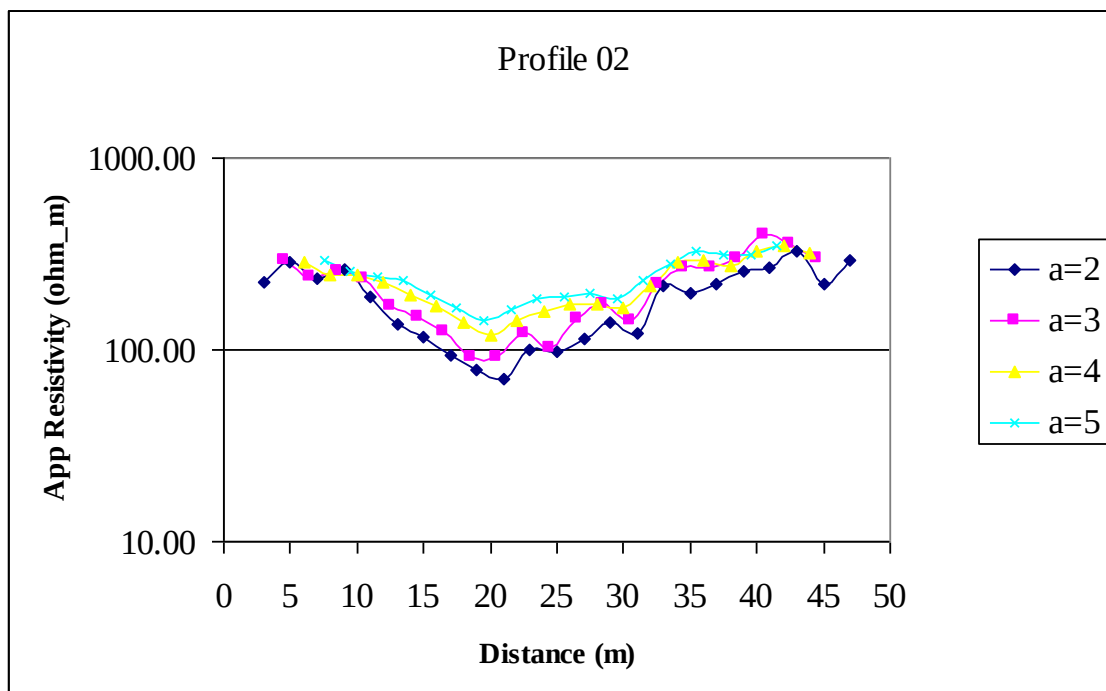


شکل ۴-۹: مقطع قائم از رسوبات سطحی منطقه برداشت، این مقطع دارای امتدادی عمود بر راستای پروفیل ۱ و به فاصله ۵ متر از ابتدای آن واقع است.

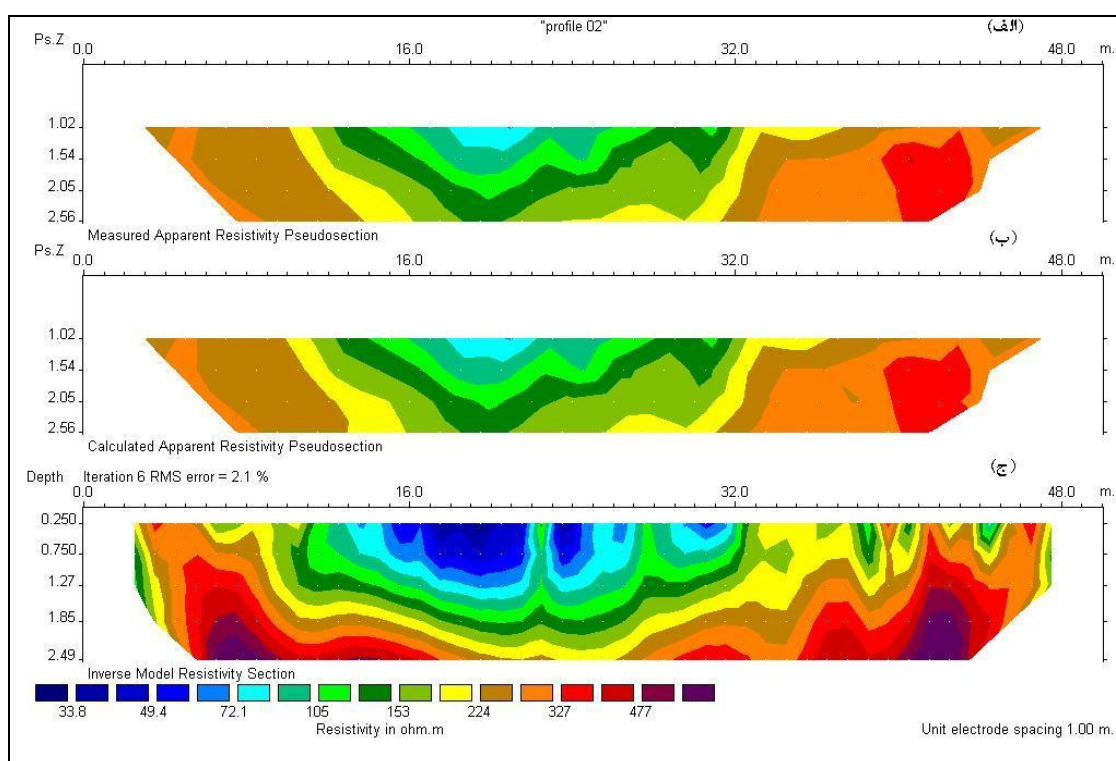
پروفیل ۲ به فاصله ۳۰ متر از پروفیل ۱ و به طول ۵۰ متر بر روی مجرای قنات در نظر گرفته شد. برداشت‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر و با فواصل میان الکترودی ۲، ۳، ۴ و ۵ متر بر روی

این پروفیل صورت گرفت. این پروفیل به صورت اتفاقی از روی یکی از میله‌های قنات می‌گذرد. قنات در محل این پروفیل در فاصله ۲۲ متری از ابتدای آن و در عمق تقریبی ۲/۵ متری واقع است. پروفیل‌های مقاومت ویژه که در شکل ۴-۱۰ دیده می‌شوند، عموماً یک روند افزایش مقاومت ویژه از سطح به عمق را نشان می‌دهند. همان‌طور که در مورد پروفیل ۱ گفته شد، این اثر را می‌توان به اثر روباره رسانا و همچنین افزایش میزان رس در طبقات فوقانی خاک نسبت داد. پروفیل‌های مقاومت ویژه با فواصل میان الکترودی ۲ و ۳ متر همانند پروفیل‌های مشابه در شکل ۴-۷، روند ناهنجارتری نسبت به پروفیل‌های با طول آرایه بیشتر از خود نشان می‌دهند. این اثر به دلیل تغییرات بیشتر و نامنظم‌تر لایه‌های فوقانی خاک می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد قنات در فاصله ۲۲ متری از طول پروفیل واقع است و پروفیل‌های مقاومت ویژه به فاصله چند متر از محل گذر قنات یک کاهش مقاومت ویژه را نشان می‌دهند. در این پروفیل رسوبات ریزدانه رسی ناشی از لای‌روبی قنات و احتمالاً تمرکز رسوبات رسی به علت توپوگرافی کم ارتفاع این منطقه نسبت به اطراف، به خوبی قابل تشخیص است.

در شکل ۴-۱۱ شبه مقاطع و مقطع مقاومت ویژه دو بعدی حاصل از مدل سازی وارون مربوط به پروفیل ۲ به نقشه در آمده است. مقطع حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها (شکل ۴-۱۱ ج)) دو توده با رسانندگی بالای نزدیک به سطح در اطراف قنات نشان می‌دهد. اثر میله و مجرای قنات به صورت یک منطقه با مقاومت ویژه نسبی بالاتر در موقعیت ۲۲ متری از مقطع مدل سازی شده، دیده می‌شود. روند کاهش مقاومت ویژه از عمق به سطح زمین نشان دهنده افزایش میزان رس در لایه‌های فوقانی خاک می‌باشد. همان‌طور که از مقطع مدل سازی شده نیز دیده می‌شود، روش مقاومت ویژه قادر به تفکیک آب از خاک با رسانندگی بالای منطقه نبوده است.



شکل ۴-۱۰: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۲.



شکل ۴-۱۱: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه پروفیل ۲. شبه مقطع داده های مقاومت ویژه اندازه گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

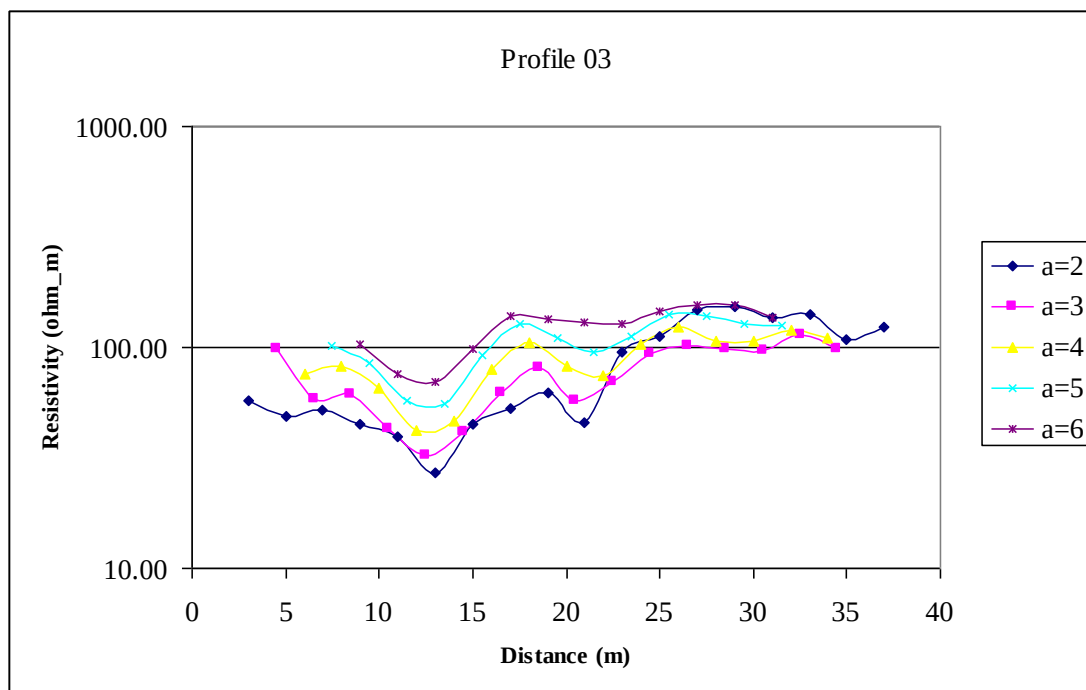
پروفیل ۳ به فاصله ۶۰ متر از پروفیل ۲ و به طول ۴۰ متر بر روی قنات در نظر گرفته شد. همان‌طور که از عکس هوایی منطقه برداشت در شکل ۴-۲ مشخص است، این پروفیل بر روی جاده‌ای گذرنده از روی قنات آب انتخاب شد. مجرای قنات در محل این پروفیل در فاصله ۱۹ متری و در عمق تقریبی ۳ تا ۳/۵ متری واقع است. برداشت‌های مقاومت ویژه بر روی این پروفیل نظیر دو پروفیل قبلی، به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش و نر و با فواصل میان الکترودی ۲، ۳، ۴، ۵ و ۶ متر صورت گرفت.

شکل ۴-۱۲ پروفیل‌های مقاومت ویژه برداشت شده بر روی پروفیل ۳ را نشان می‌دهد. همانند پروفیل‌های ۱ و ۲ که قبلاً بررسی شد، با افزایش فاصله میان الکترودی یک روند افزایش مقاومت ویژه نسبت به عمق قابل مشاهده است که نشان دهنده وجود رس بالاتر در طبقات فوقانی خاک می‌باشد. در فاصله ۲۳ تا ۳۵ متری پروفیل با فاصله میان الکترودی ۲ متری، یک اثر افزایش مقاومت ویژه مشاهده می‌شود. افزایش مقاومت ویژه در این ناحیه، منطبق بر مرکز جاده مذکور است. این اثر ناشی از تراکم و سخت‌شدگی خاک، در اثر عبور وسایل نقلیه از این قسمت می‌باشد. برای ساخت این جاده از رسوبات شنی استفاده شده و ارتفاع شانه این جاده نسبت به اطراف در انتهای پروفیل به ۱ متر هم می‌رسد.

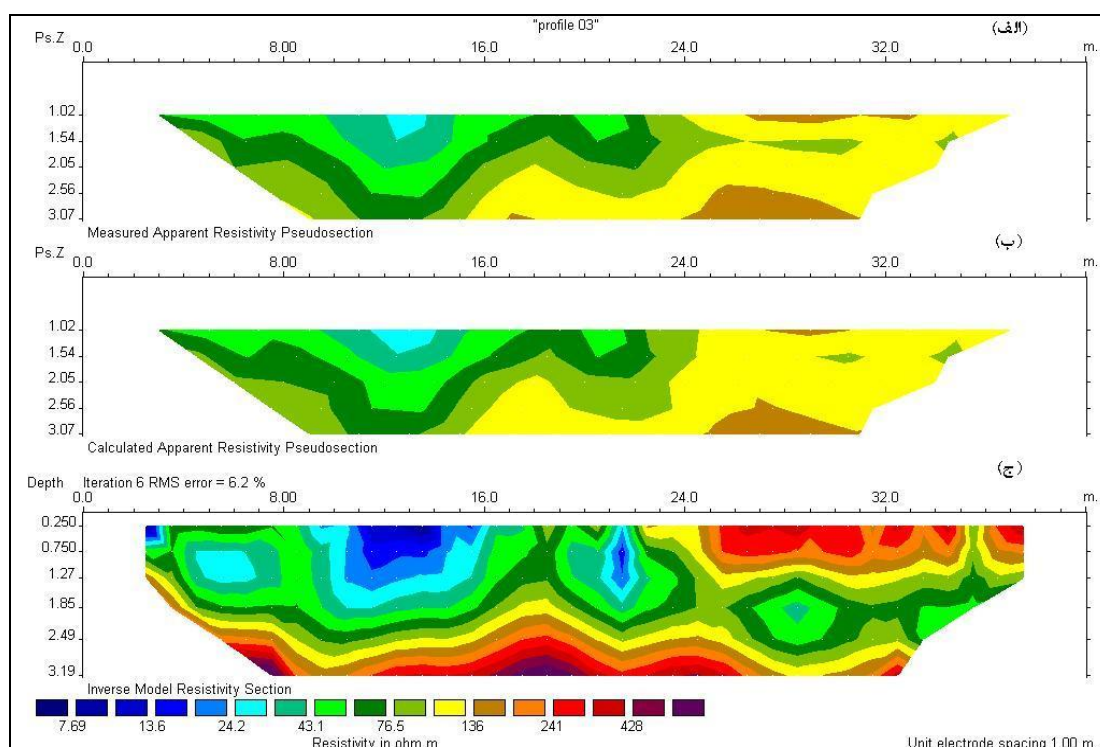
همان‌طور که از پروفیل‌های مقاومت ویژه در شکل ۴-۱۲ دیده می‌شود، یک اثر افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات نسبت به اطراف آن مشهود است. همانند پروفیل ۱، بتن و هوای درون مجرای قنات به صورت توده‌ای مقاوم در مقایسه با رسوبات اطراف آن بر روی این پروفیل‌ها دیده می‌شود. اثر کاهش مقاومت ویژه در سمت چپ قنات (قسمت‌های ابتدایی پروفیل) از سمت راست آن بیشتر است. در پروفیل با فاصله میان الکترودی ۶ متری، اثر کاهش مقاومت ویژه تنها در سمت چپ قنات به چشم می‌خورد. این اثر احتمالاً از ضخامت بیشتر رسوبات رسی حاصل از لای‌روبی قنات در این ناحیه که در زیر جاده قرار گرفته اند، نشأت گرفته است.

مطالب مذکور در بالا به خوبی در مقطع مدل سازی شده که در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است، دیده می‌شوند. این پروفیل نیز همانند پروفیل‌های ۱ و ۲ به دلیل وجود میزان رس بالا در طبقات فوقانی خاک، توده‌های رسانی نزدیک به سطح را در مقطع مدل سازی شده نشان می‌دهد. در فاصله ۲۵ تا ۳۵ متری از مقطع مدل سازی شده (شکل ۴-۱۳ ج)، منطقه متراکم جاده در اثر عبور وسایل نقلیه به صورت یک بی-هنجاری با مقاومت ویژه بالا دیده می‌شود.

سه پروفیل مقاومت ویژه که در بالا ذکر شد به دلیل عدم وجود تباین کافی در مقاومت ویژه آب قنات و همچنین کوچک بودن ابعاد قنات نسبت به عمق آن قادر به آشکارسازی آب قنات نبوده و تنها بتن و هوای درون مجرای قنات (در مقایسه با رسوبات اطراف آن) را با مقاومت ویژه بالا، مشخص نموده‌اند. به دلیل وجود رطوبت در اطراف مجرای قنات و وجود آب درون آن، و همچنین کوچک بودن ابعاد منطقه با مقاومت ویژه بالا (هوا و بتن داخل مجرای قنات) و قدرت تفکیک پایین روش مقاومت ویژه (با استفاده از آرایش ونر)، مقاطع مدل سازی نیز قادر به آشکارسازی منطقه با مقاومت ویژه بالا نبوده‌اند.



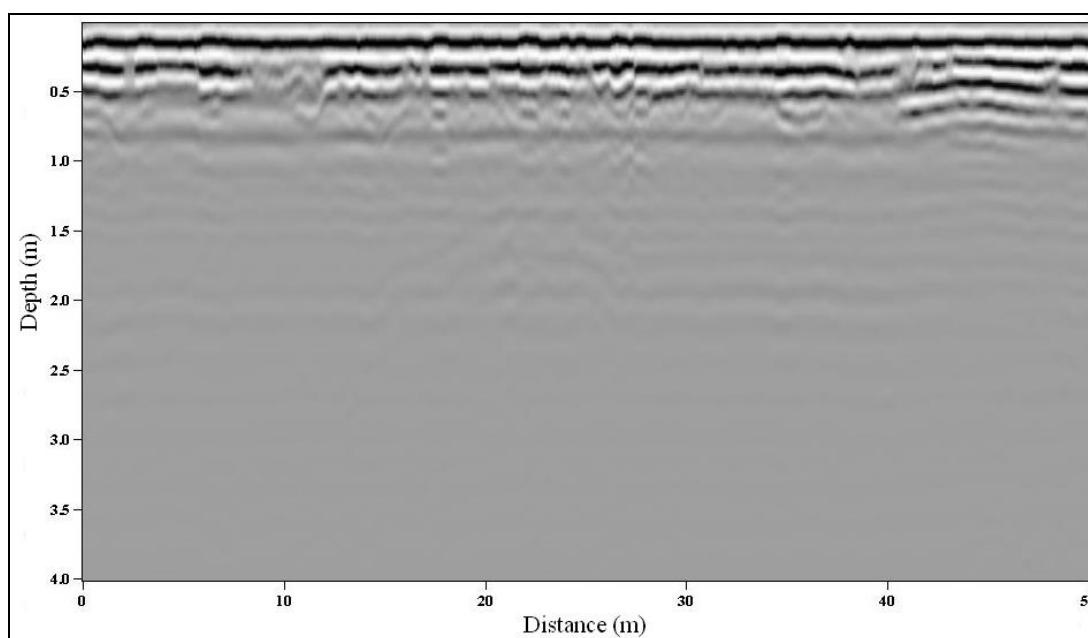
شکل ۴-۱۲: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۳.



شکل ۴-۱۳: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های مقاومت ویژه پروفیل ۳. شبه مقطع داده های مقاومت ویژه اندازه گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

۴-۳-۲- اندازه‌گیری‌های GPR

اندازه‌گیری داده‌های GPR با فواصل ایستگاهی ۵ سانتیمتر و با انتخاب پنجره زمانی ۱۰۰ نانو ثانیه بر روی پروفیل ۱ صورت گرفت. مجرای قنات در محل این پروفیل در ۲۴/۵ متری و در عمق ۲ تا ۲/۵ متری پروفیل واقع است. بر خلاف پروفیل صفر، تعداد ردهای دسته شده در هر ایستگاه را برابر مقدار ۱۲۸ رد در نظر گرفتیم. این تعداد بالای ردهای دسته شده، زمان برداشت داده‌ها را افزایش می‌دهد. مقطع عمقی داده‌های GPR بر روی این پروفیل با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت با استفاده از سرعت ۰/۱ متر بر نانوثانیه و همچنین اعمال بهره اتوماتیک در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده است.



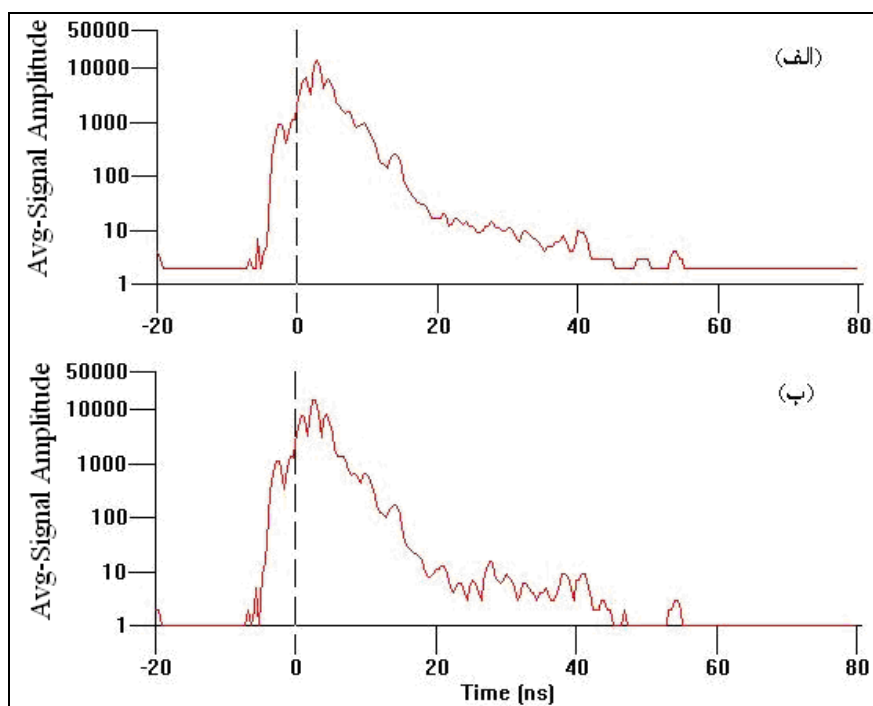
شکل ۴-۱۴: مقطع عمقی داده‌های GPR برای پروفیل ۱ با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت و بهره اتوماتیک.

همان‌طور که از مقطع عمقی داده‌های GPR در شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود، اثری از قنات آب در این مقطع به چشم نمی‌خورد. میزان رس بالا در خاک این منطقه نفوذ امواج GPR را تحت تأثیر قرار داده و روش GPR در این منطقه از عمق نفوذ کمی برخوردار است. رس‌ها به دلیل وجود آب در ساختار شبکه‌ای آنها [۲۷] و به همین دلیل افزایش رسانندگی الکتریکی آنها، تأثیرات نامطلوبی بر نفوذ امواج GPR می‌گذارند. برداشت‌های مقاومت ویژه در این پروفیل که در شکل ۴-۷ آورده شد، نشان دهنده رسانندگی قابل توجه خاک این منطقه

و به ویژه نواحی اطراف قنات آب می‌باشد. رسانندگی محیط تحت بررسی بیشترین نقش را در اتلاف امواج GPR در ساختارهای‌های زیرسطحی ایفا می‌کند [۲۵،۳۷].

این پروفیل و پروفیل صفر حدوداً ۳ الی ۴ متر از حفاظ‌های فلزی فاصله داشته و به موازات این حفاظ‌ها در نظر گرفته شده‌اند. از آنجا که فلزات دارای توان بازتاب بالای امواج GPR می‌باشند، در این فاصله کوتاه از دستگاه GPR می‌توانند اثرات نامطلوبی بر داده‌های برداشتی داشته باشند [۳۶]. استفاده از آنتن‌های پوششی ما را مجاز به انتخاب پروفیل‌ها در مجاورت این‌گونه ساختارها می‌نماید. چنانچه از مقاطع GPR در این پروفیل‌ها دیده می‌شود، اثرات نامطلوب این ساختارها در مقاطع به چشم نمی‌خورد.

در شکل ۴-۱۵ نمودار میانگین دامنه سیگنال بر حسب زمان برای پروفیل صفر و پروفیل ۱ که با استفاده از نرم افزار Win_EKKO Pro به دست آمده‌اند، آورده شده است. در این نمودارها، محور افقی نشان دهنده زمان (برحسب نانو ثانیه) و محور عمودی نشان دهنده دامنه سیگنال می‌باشد. این نمودارها قبل از اعمال هرگونه فیلتر و یا بهره‌ای بر روی داده‌های GPR بدست آمده‌اند. شکل (الف)، میانگین دامنه سیگنال پروفیل صفر و شکل (ب)، میانگین دامنه سیگنال پروفیل ۱ را نمایش می‌دهد. برای بدست آوردن ایده‌ای منطقی از عمق نفوذ امواج GPR و پاسخ از اهداف زیرسطحی، این نمودارها اطلاعات ارزشمندی در اختیار قرار می‌دهند. اتلاف نمایی دامنه سیگنال در این نمودارها نشان دهنده افت شدید دامنه سیگنال نسبت به عمق می‌باشد. همانطور که از این شکل‌ها دیده می‌شود، بعد از زمان ۴۵ نانوثانیه، که با استفاده از اطلاعات مربوط به سرعت موج در محیط منطبق بر عمق تقریبی ۲/۲۵ متر می‌باشد، امواج دریافتی در گیرنده به حد نوفه‌های زمینه در محیط می‌رسند. عمق نفوذ حتی از این مقدار هم کمتر است. در مکان‌هایی از پروفیل نظیر اطراف قنات که وجود رسوبات ریزدانه رسی در روی سطح ناشی از لای‌روبی قنات و همچنین رطوبت خاک در اطراف مجرای قنات باعث افزایش رسانندگی محلی خاک نسبت به اطراف آن می‌باشد. از این رو در این نواحی، عمق نفوذ کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. به این ترتیب مجرای قنات که در عمق بیشتر از ۲ متر واقع است توسط روش GPR قابل آشکارسازی نمی‌باشد.



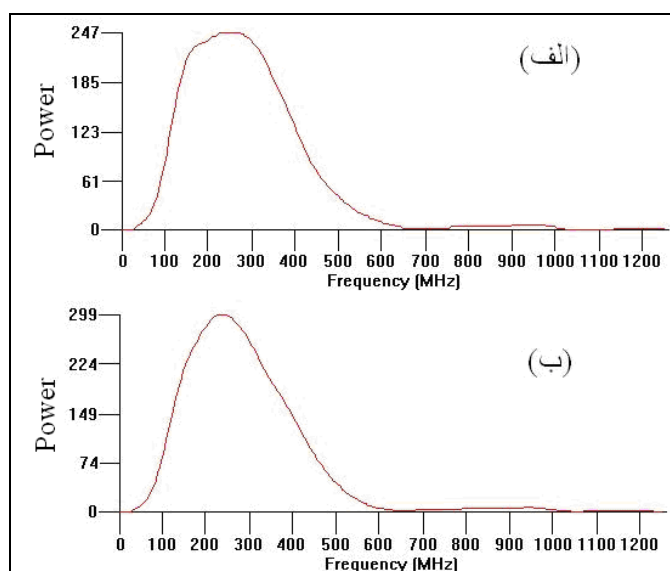
شکل ۴-۱۵: میانگین دامنه سیگنال بر حسب زمان برای پروفیل صفر (الف) و پروفیل ۱ (ب).

برای نشان دادن اثر افزایش تعداد ردهای دسته شده، منحنی میانگین دامنه بر حسب زمان این دو پروفیل با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌طور که ذکر شد، شکل (الف) مربوط به پروفیل صفر و با تعداد ۱۶ رده دسته شده می‌باشد. نوفه‌های زمینه در این شکل قبل از زمان صفر و بعد از اتلاف کامل سیگنال به صورت یک خط افقی دیده می‌شوند. این نوفه‌ها با افزایش تعداد ردهای دسته شده به میزان ۱۲۸ رده در شکل (ب) که میانگین دامنه سیگنال در پروفیل ۱ می‌باشد، حذف شده‌اند. در این محیط میزان این نوفه‌ها پایین است و در اندازه-گیری‌ها تأثیرات نامطلوب قابل توجهی را سبب نمی‌شود. اما در محیط‌هایی که میزان این نوفه‌ها بالا است، افزایش تعداد ردهای دسته شده می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

میانگین طیف فرکانس بازگشتی در آنتن گیرنده برای پروفیل صفر و پروفیل ۱ با استفاده از نرم افزار Win_EKKO Pro بدست آمده و در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. محور افقی در این شکل نشان دهنده فرکانس (برحسب مگاهرتز) و محور قائم نسبتی از ضرایب تبدیل فوریه برای هماهنگی‌های موجود در موج دریافتی و یا مقدار انرژی متناسب با هر فرکانس می‌باشند.^{۱۰۸} شکل (الف) مربوط به پروفیل صفر و شکل (ب)

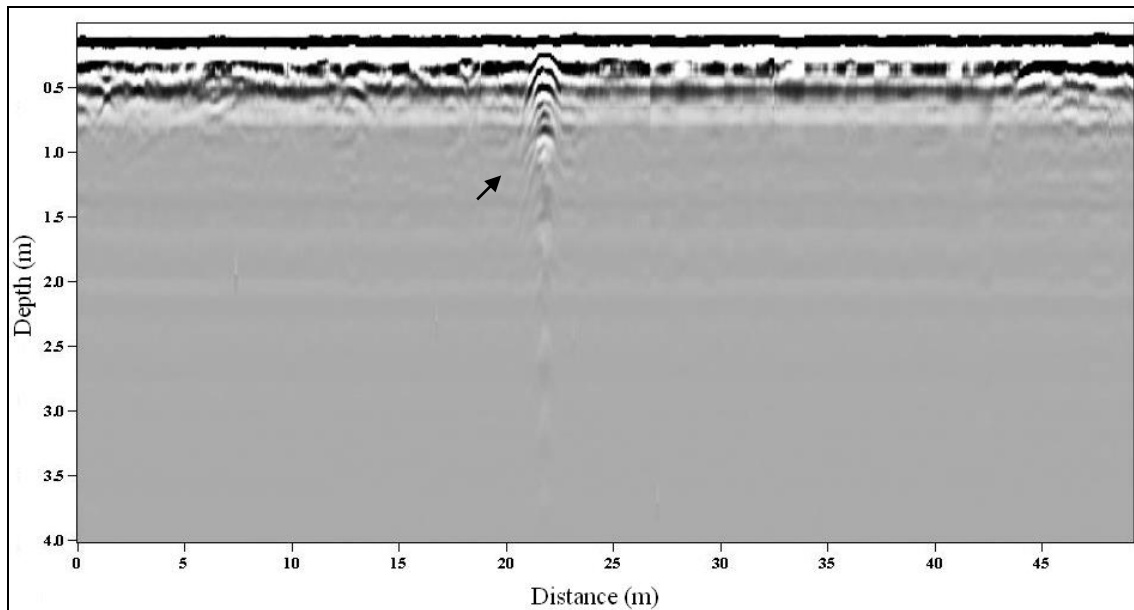
^{۱۰۸} برای مطالعه بیشتر به منبع شماره ۳ در فهرست منابع مراجعه کنید.

برای پروفیل ۱ می‌باشد. طول پنجره زمانی در هر دو پروفیل یکسان بوده و همان‌طور که از شکل دیده می‌شود، نقطه اوج^{۱۰۹} هر دو نمودار در فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز می‌باشد. این مسئله از یکسان بودن مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی در هر دو پروفیل ناشی شده است. با توجه به فرکانس مرکزی بازگشتی که در حدود ۲۵۰ مگاهرتز بوده و سرعت امواج GPR در محیط که برابر ۰/۱ متر بر نانوثانیه می‌باشد، طول موج فرکانس مرکزی از رابطه (۲-۱۰) قابل محاسبه است. با جایگذاری مقادیر ذکر شده در رابطه فوق مقدار طول موج برای فرکانس مرکزی مزبور در این محیط برابر ۴۰ سانتیمتر می‌باشد. از این رو قدرت تفکیک قائم روش GPR در این محیط را می‌توان در حدود ۲۰ سانتیمتر در نظر گرفت.



شکل ۴-۱۶: میانگین طیف فرکانس بازگشتی در آنتن گیرنده برای پروفیل صفر (الف) و پروفیل ۱ (ب).

مقطع عمقی حاصل از اندازه‌گیری‌های GPR بر روی پروفیل ۲ در شکل ۴-۱۷ آورده شده است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد این پروفیل بر روی یکی از میله‌های قنات واقع شده است. مقطع عمقی داده‌های GPR با استفاده از سرعت ۰/۱ متر بر نانوثانیه و با اعمال فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک بدست آمده است.



شکل ۴-۱۷: مقطع عمقی داده‌های GPR برای پروفیل ۲ با اعمال فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک.

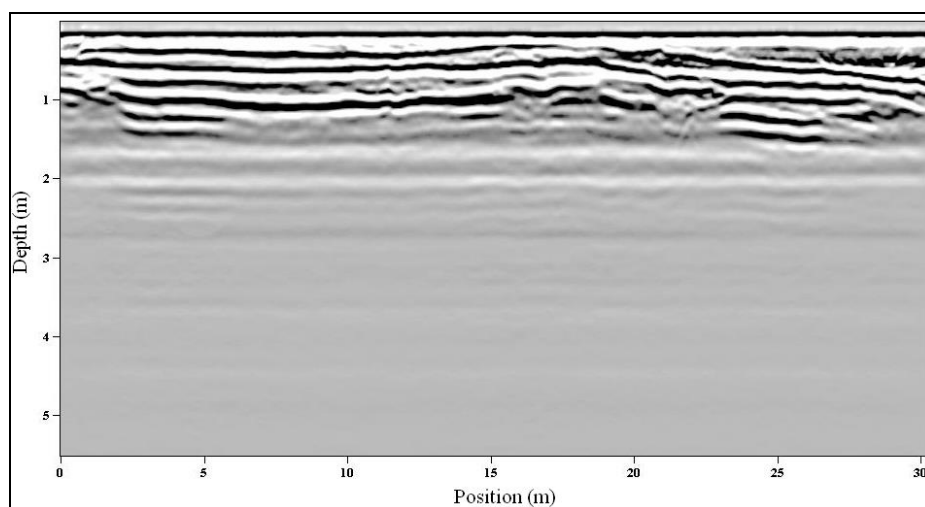
اثر میله قنات در ۲۲ متری پروفیل به وضوح مشخص است و با فلش نشان داده شده است. این پالس‌های با دامنه بلند و متوالی ناشی از عبور امواج GPR از هوای داخل میله قنات و بازآوایش^{۱۱۰} امواج درون این منطقه کم اتلاف می‌باشند.

همان‌طور که در شکل ۴-۲ دیده می‌شود پروفیل ۳ بر روی جاده‌ای گذرنده از روی قنات آب انتخاب شد. ارتفاع این جاده نسبت به اطراف آن در انتهای پروفیل حتی به ۱ متر نیز می‌رسد. با توجه به محدودیت‌های دستگاه GPR مورد استفاده در توپوگرافی‌های ناهموار، طول پروفیل GPR از پروفیل مقاومت ویژه متناظر آن کوتاه‌تر و برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شد. شکل ۴-۱۸ مقطع عمقی داده‌های GPR بر روی این پروفیل را نشان می‌دهد. از آنجا که امواج GPR به دلیل رسانندگی محیط تحت بررسی از عمق نفوذ کمی برخوردارند، روش GPR در آشکارسازی قنات آب موفق نبوده است. شکل‌های ۴-۱۸ الف و ۴-۱۸ ب، با اعمال پردازش‌های یکسان Dewow و مهاجرت با استفاده از سرعت ۰/۱ متر بر نانوثانیه به دست آمده‌اند. دلیل تفاوت در شکل این مقاطع استفاده از دو نوع بهره مختلف می‌باشد. برای نمایش شکل ۴-۱۸ الف از بهره AGC با مقدار حداکثر بهره ۳۰۰ و برای نمایش شکل ۴-۱۸ ب از بهره SEC به ازاء ثابت اتلاف ۵، و مقدار ابتداء ۱ و مقدار حداکثر ۵۰۰، استفاده شده است. مقادیر ذکر شده پارامترهای مستقل برای هر یک از بهره‌های ذکر شده می‌باشند.

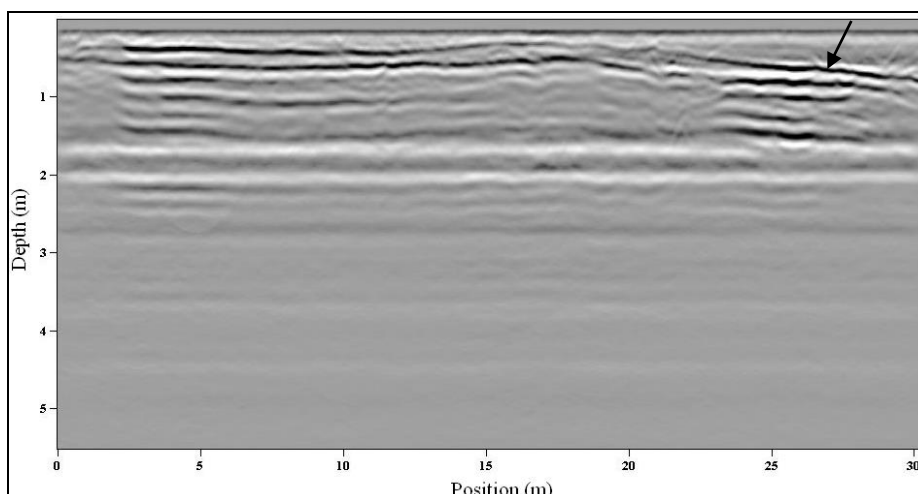
¹¹⁰ Reverberation

این پارامترها با توجه به هدف مورد مطالعه، اطلاعات جانبی و نتایج مورد انتظار توسط پردازش‌گر تعیین می‌شوند. از آنجا که دامنه بسیار وسیعی از انتخاب‌ها موجود است، انتخاب صحیح این پارامترها از وظایف مهم پردازش‌گر در تولید مقاطع صحیح از داده‌ها می‌باشد. چنانچه در فصل دوم نیز به آن اشاره شد، انتخاب صحیح این پارامترها نه فقط برای بهره‌ها، بلکه برای تمامی پردازش‌ها برای رسیدن به مقطع نهایی مورد نظر بسیار حیاتی است.

(الف)



(ب)



شکل ۴-۱۸: مقطع عمقی داده‌های GPR بروی پروفیل ۳ با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت و بهره AGC (الف) و مقطع عمقی به دست آمده با اعمال پردازش‌های مربوط به شکل (الف) و با به کار بردن بهره SEC به جای بهره AGC (ب).

قنات در ۱۹ متری پروفیل واقع شده و اثر پی جاده از ابتدا تا انتهای پروفیل به صورت یک بازتاب پیوسته دیده می‌شود. رویداد شیب‌دار که از ۲۰ متری شروع و تا انتهای پروفیل ادامه می‌یابد از افزایش تدریجی ارتفاع جاده نسبت به اطراف آن در این قسمت ناشی شده است. از ۱۷ تا ۲۱ متری مقطع (الف) در شکل ۴-۱۸ که منطبق بر محل عبور قنات آب می‌باشد بازتاب‌ها پیوستگی خود را از دست می‌دهند. این اثر را می‌توان ناشی از انباشتن خاک حاصل از حفاری و لای‌روبی بر روی مسیر قنات در زیر جاده مزبور دانست.

این پروفیل نیز همانند پروفیل ۱ اثری از قنات آب، نشان نمی‌دهد. این امر از رسانندگی بالای خاک این منطقه و به واسطه آن اتلاف امواج GPR در ساختارهای زیرسطحی، ناشی شده است. همان‌طور که از مقاطع شکل ۴-۱۸ دیده می‌شود عمق نفوذ در این منطقه در حدود ۲ متر می‌باشد، در صورتی که مجرای قنات در محل این پروفیل در عمق تقریبی ۳ تا ۳/۵ متری واقع است.

مسئله قابل توجه در شکل ۴-۱۸-ب عدم نمایش بازتاب‌ها (بازتاب‌ها به زحمت قابل تشخیص‌اند) در فاصله ۱۲ تا ۲۳ متری پروفیل و در عمق بیش از ۰/۵ متر می‌باشد. حذف و عدم نمایش بازتاب‌ها در این منطقه به سبب اتلاف بیشتر امواج در این ناحیه است. با توجه به پروفیل‌های مقاومت ویژه در شکل ۴-۱۲، این منطقه منطبق بر نواحی با مقاومت ویژه پایین است. دلیل این امر را می‌توان به وجود رطوبت در خاک منطقه و یا حضور رسوبات ریزدانه (عمدتاً رسی) بر اثر لای‌روبی متناوب قنات نسبت داد. از آنجا که این اندازه‌گیری‌ها بر روی نواحی نزدیک مظهر قنات صورت گرفته است، احتمال حضور رسوبات رسی در پایین دست بیشتر است. همان‌طور که از مقطع نشان داده شده در شکل ۴-۱۸-ب دیده می‌شود، نواحی پراتلاف در قسمت‌های نزدیک به سطح دیده می‌شوند. به همین جهت کاهش مقاومت ویژه در پروفیل‌های مقاومت ویژه شکل ۴-۱۲ و همچنین نواحی پراتلاف در مقطع GPR را می‌توان بیشتر ناشی از وجود نهشته‌های رسی حاصل از لای‌روبی قنات، در نزدیک سطح دانست تا اینکه آن را به خاصیت موینگی محیط نسبت دهیم. زیرا بعید به نظر می‌رسد که منطقه موئینه تا سطح زمین امتداد یابد.

مسئله‌ای که اهمیت خود را در شکل ۴-۱۸ نشان می‌دهد استفاده از پردازش مناسب در جستجوی هدف مورد مطالعه است. در شرایطی نظیر مطالعات رسوب شناسی که نمایش پیوستگی بازتاب‌های حاصل از فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است، احتمالاً استفاده از پردازش‌هایی که منجر به تولید مقطع نشان داده شده در شکل ۴-۱۸-الف گردید، بسیار مفیدتر است. اما در مطالعات زیست‌محیطی از آنجا که نواحی آلوده از

رسانندگی الکتریکی بالایی برخوردارند، نواحی با اتلاف بالا در مقاطع GPR را سبب می‌شوند. از این رو مقاطعی نظیر شکل ۴-۱۸-ب هدف نهایی در چنین مطالعاتی است.

با توجه به این ۳ پروفیل GPR که در این بخش مورد بررسی قرار گرفتند، به دلیل عمق نفوذ محدود امواج GPR در این‌گونه محیط‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که روش GPR در آشکار سازی قنات آب در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا موفق نبوده است.

۴-۴- اندازه‌گیری بر روی پروفیل‌های میانی تا انتهایی

۴-۴-۱- اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه

همان‌طور که در بخش قبل ملاحظه شد، مجرای قنات آب در این منطقه در اعماقی بیش از عمق نفوذ روش GPR (با استفاده از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز) واقع است. از این رو اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه را به صورت مجزا از پروفیل‌های GPR، بررسی می‌کنیم.

فاصله بین تمام پروفیل‌های مقاومت ویژه به جز فاصله بین پروفیل‌های ۱ و ۲ که ۳۰ متر و فاصله بین پروفیل‌های ۸ و ۹ که ۸۰ متر می‌باشد، برابر ۶۰ متر در نظر گرفته شد.

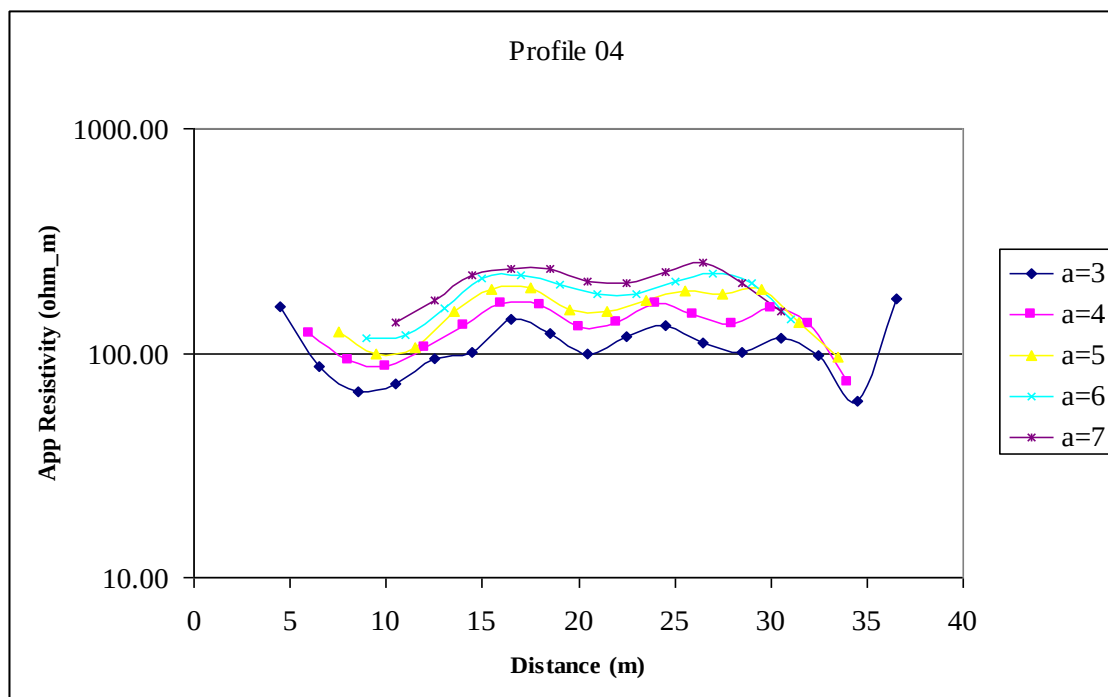
۴-۴-۱-۱- پروفیل ۴

اندازه‌گیری مقاومت ویژه بر روی پروفیل ۴ به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ورنر و به ازاء فواصل میان الکترودی ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ متر صورت گرفت. مجرای قنات در محل این پروفیل در عمق تقریبی کمتر از ۴ متر و در فاصله ۱۶ متری از ابتدای پروفیل واقع است.

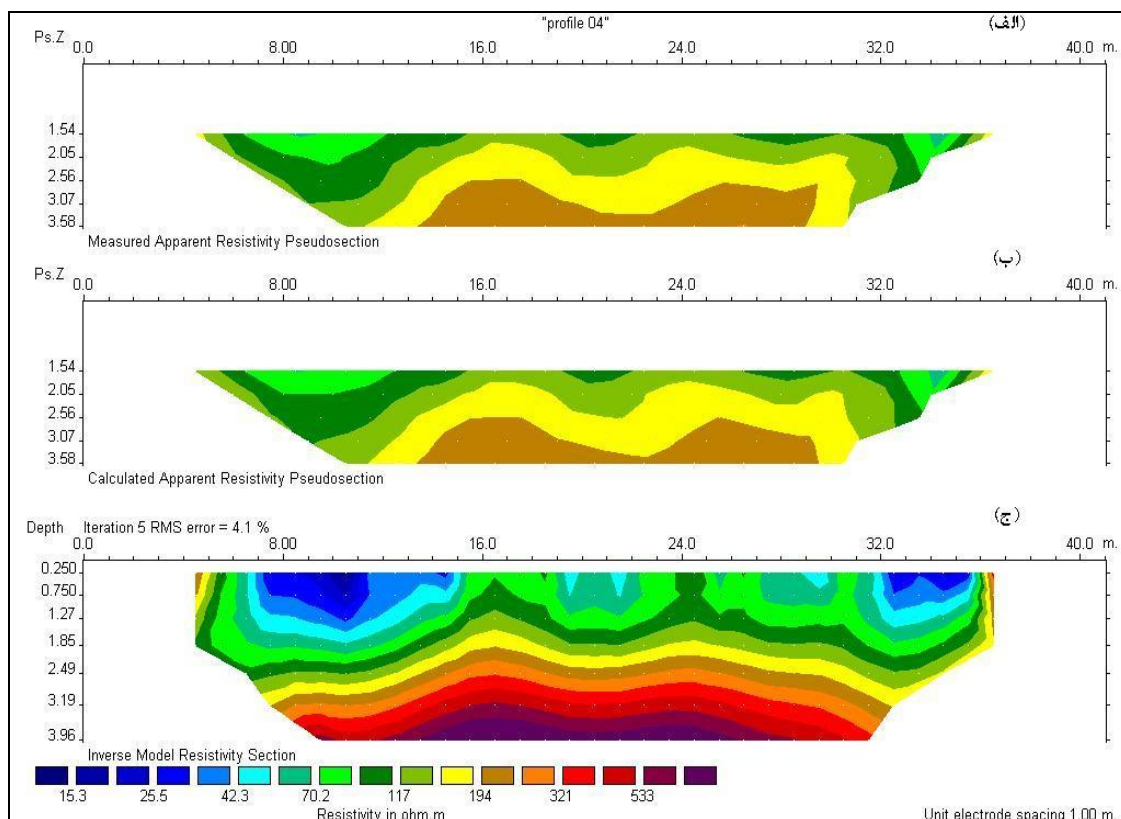
در شکل ۴-۱۹ پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی این پروفیل در نمودار نیمه لگاریتمی، نشان داده شده است. همان‌طور که از روی شکل ۴-۱۹ دیده می‌شود، تمامی پروفیل‌ها به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف در محل عبور مجرای قنات در فاصله ۱۶ متری یک افزایش مقاومت

ویژه نسبت به اطراف نشان می‌دهند. همانند پروفیل‌های ۱ و ۳ این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا ناشی از وجود کول‌های بتنی و وجود هوای داخل مجرای قنات آب می‌باشد. روند افزایش مقاومت ویژه نسبت به عمق در این پروفیل نیز به خوبی دیده می‌شود. این اثر همانند پروفیل‌های بررسی شده قبلی ناشی از اثر روباره رسانا و احتمالاً افزایش میزان رس در طبقات فوقانی خاک می‌باشد. همان‌طور که از پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری در شکل ۴-۱۹ دیده می‌شود اثر افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات در تمام پروفیل‌ها به خوبی قابل تشخیص است. از این‌رو قنات آب با ابعادی در حدود ۱ متر و در عمق تقریبی کمتر از ۴ متر اثر خود را بر روی تمامی این پروفیل‌ها نشان می‌دهد.

در شکل ۴-۲۰ شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون مربوط این پروفیل به نمایش درآمده است. اثر افزایش مقاومت ویژه نسبت به عمق در مقطع دو بعدی حاصل از مدل‌سازی وارون (شکل ج))، به خوبی قابل تشخیص است. مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون همانند پروفیل‌هایی که در بخش قبل بررسی شد، در مشخص کردن محل قنات آب موفق عمل نکرده است.



شکل ۴-۱۹: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۴.



شکل ۴-۲۰: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۴. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل‌سازی وارون (ج).

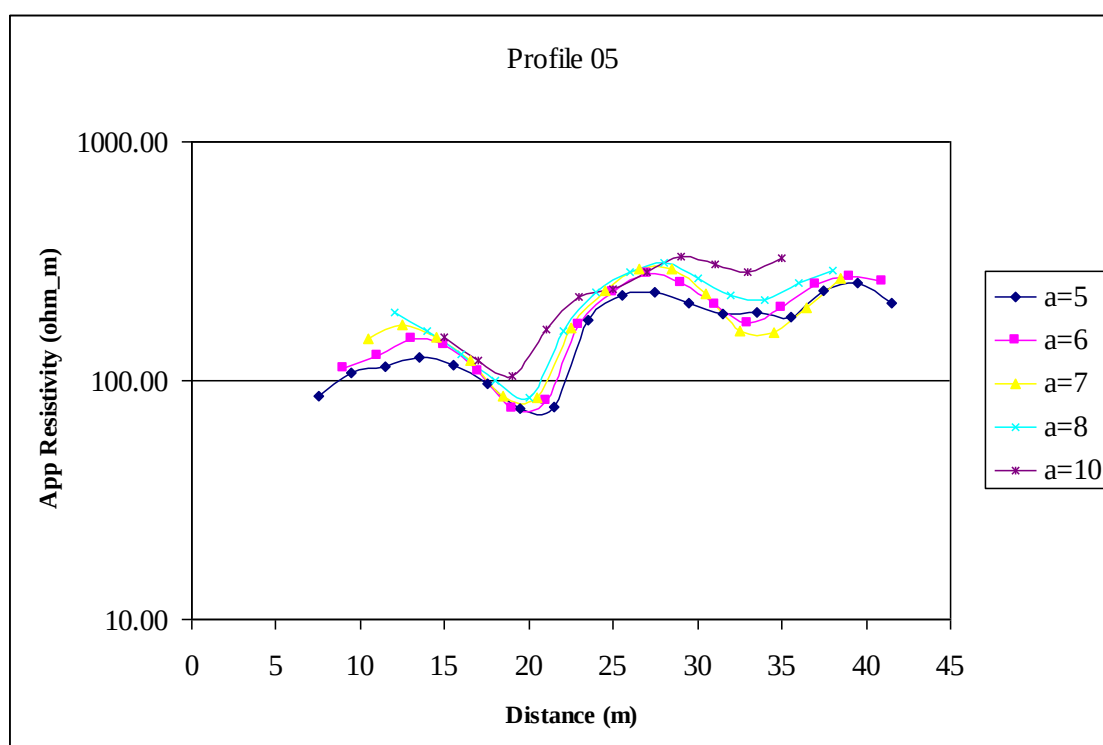
۴-۱-۲-۴-۵- پروفیل ۵

پروفیل ۵ به فاصله ۶۰ متر از پروفیل ۴ و به طول ۵۰ متر در نظر گرفته شد. در این پروفیل داده‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی توسط آرایش‌های ونر و آرایش دوقطبی-دوقطبی برداشت شدند. برداشت مقاومت ویژه با استفاده از آرایش ونر، با فواصل میان الکترودی ۵، ۶، ۷، ۸ و ۱۰ متر و با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی، داده‌ها با فاصله دوقطبی ۳ متر و فواصل الکترودی (n های) مختلف ۱ تا ۷ انجام شد.

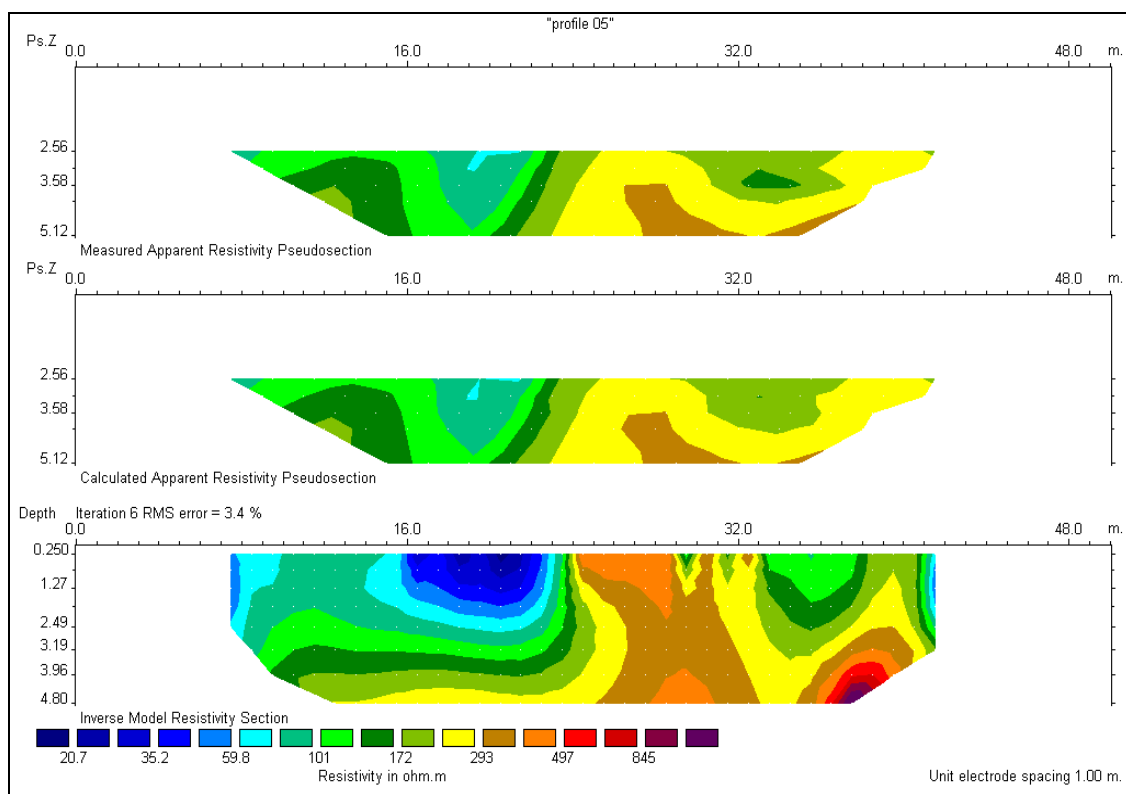
در شکل ۴-۲۱، پروفیل‌های مقاومت ویژه ونر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی این پروفیل نشان داده شده است. حدود ۲۰ متر بالاتر از این پروفیل امکان اندازه‌گیری سطح آب قنات از یکی از میله‌های آن وجود داشت. این نقطه با رنگ سبز در شکل ۴-۲۱ نمایش داده شده است. به این ترتیب عمق قنات در محل این پروفیل در حدود ۴/۵ متر می‌باشد. همچنین قنات آب در فاصله ۲۵ الی ۲۶ متری از طول پروفیل واقع است. همان‌طور که از پروفیل‌های مقاومت ویژه ونر در شکل ۴-۲۱ دیده می‌شود، پروفیل‌های با فاصله میان الکترودی ۶، ۷ و ۸ متر به خوبی اثر افزایش مقاومت ویژه در محل قنات آب را نشان می‌دهند. این اثر را همانند پروفیل‌های قبلی به وجود ساختارهای با مقاومت ویژه بالا نظیر هوا و کول‌های بتنی در داخل مجرای قنات نسبت می‌دهیم. پروفیل با فاصله میان الکترودی ۱۰ متر اثری از افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات نشان نمی‌دهد و در این مکان اثر کاهش مقاومت ویژه نسبی مشهود است. این اثر کاهش مقاومت ویژه نسبی بر روی این پروفیل با فاصله میان الکترودی ۱۰ متر را شاید بتوان به نفوذ آب و حتی رسوبات رسی به کف و دیواره مجرای قنات نسبت داد.

یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا در ۳۹ متری پروفیل در شکل ۴-۲۱ دیده می‌شود. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا که در تمامی پروفیل‌ها دیده می‌شود، ناشی از وجود مجرای قنات دیگری در این قسمت از پروفیل می‌باشد. این قنات عاری از آب بوده و در عمق یکسانی با قنات مزبور که اندازه‌گیری‌ها بر روی آن انجام گرفت، واقع شده است. از این رو احتمال تغییر مسیر قنات در این نواحی بر اثر ریزش قنات در این خاک سست، افزایش می‌یابد. این مسئله تأکیدی بر استفاده از کول‌های بتنی درون مجرای قنات در این منطقه با خاک سست و ریزشی است. در شکل ۴-۲۲ شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به پروفیل ۵ به نمایش درآمده است. همان‌طور که در مقطع حاصل از مدل سازی وارون (شکل ۴-۲۴ج)) مشخص است، اثری از قنات آب در فاصله ۲۵ تا ۲۶ متری پروفیل دیده نمی‌شود. در حالی که اثر مجرای قنات خشک که عاری از آب و رطوبت است به صورت توده‌ای مقاوم به خوبی در فاصله ۳۹ متری

پروفیل مشهود است. نظیر چنین مشاهداتی در خصوص پروفیل صفر در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶ در آشکارسازی لوله‌های انتقال آب نیز مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۶، برداشت مقاومت ویژه (با آرایش وئر) در آشکارسازی لوله بتنی مرطوب، بسیار ضیف‌تر از آشکارسازی لوله آب خشک عمل کرده است.



شکل ۴-۲۱: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۵.



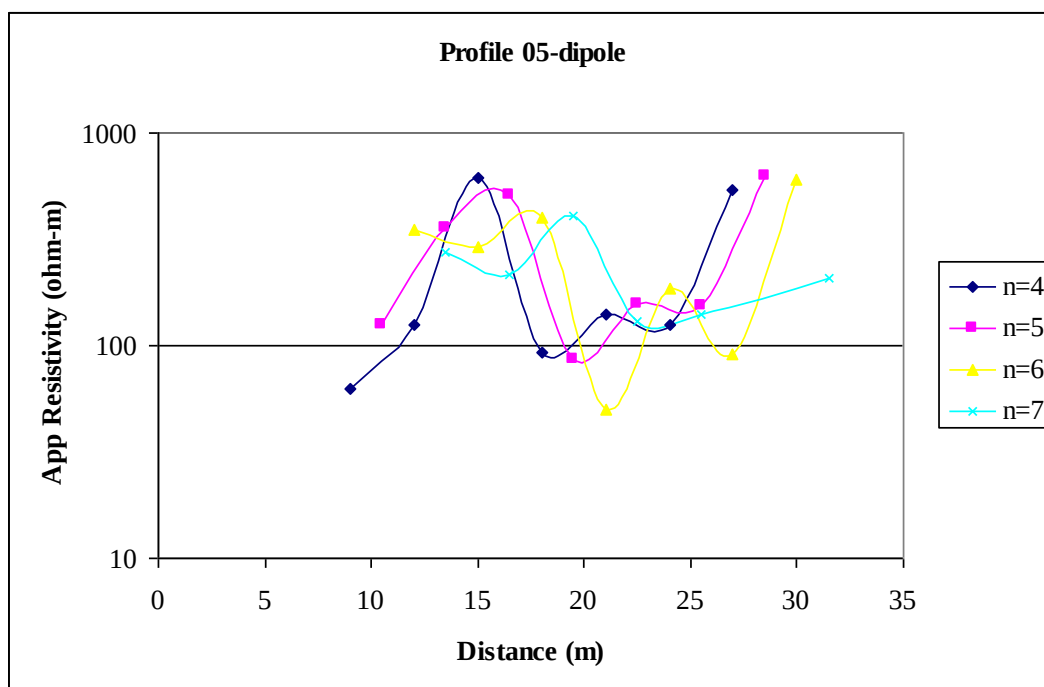
شکل ۴-۲۲: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۵. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

همان‌طور که ذکر شد بر روی این پروفیل، برداشت مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی توسط آرایش دو قطبی-دوقطبی، با فاصله ۳ متر بین دوقطبی‌ها و به ازاء n های ۱ تا ۷ نیز صورت گرفت.

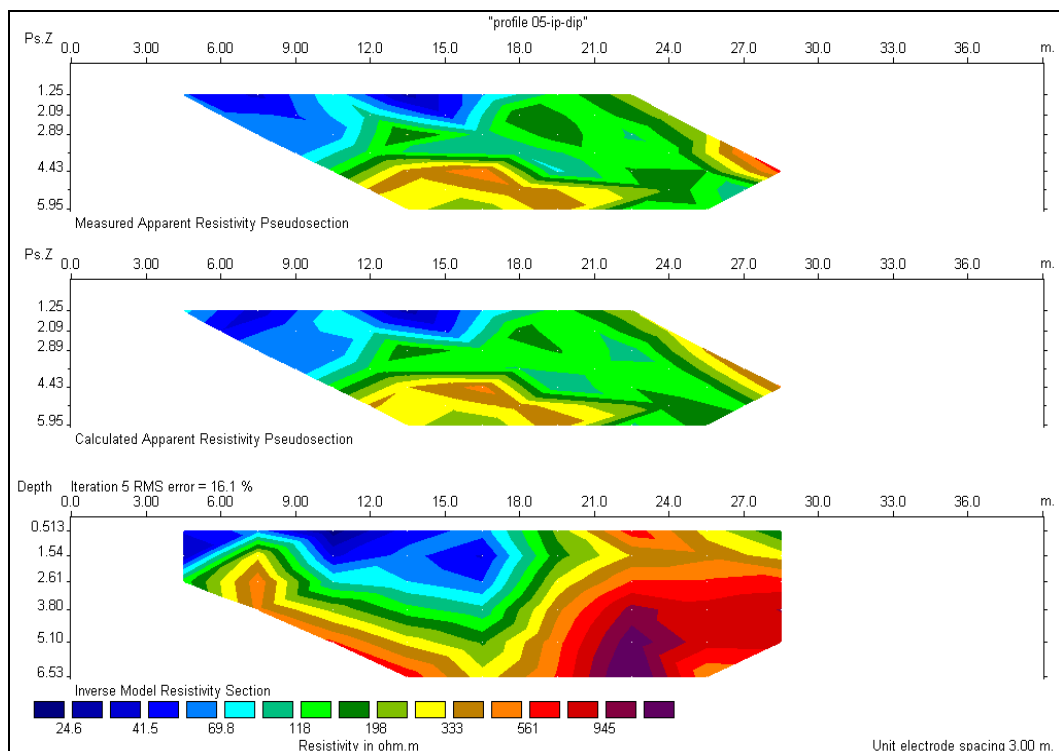
در شکل ۴-۲۳، پروفیل‌های دوقطبی-دوقطبی فقط با فواصل الکترودی (n) برابر ۴، ۵، ۶ و ۷ نشان داده شده است. همان‌طور که از روی این شکل دیده می‌شود، پروفیل‌های با n برابر ۴، ۵ و ۶، یک افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات (حدود ۲۲ تا ۲۵ متری پروفیل) نسبت به اطراف از خود نشان می‌دهند. پروفیل با فاصله الکترودی n برابر ۷ برخلاف پروفیل‌های دیگر، در محل قنات یک کاهش مقاومت ویژه از خود نشان می‌دهد. این کاهش مقاومت ویژه را می‌توان به مرطوب بودن رسوبات کف مجرای قنات و افق‌های پایین‌تر یا عمیق‌تر که در اثر نفوذ آب ایجاد شده‌اند و همچنین احتمال وجود رس بالاتر در رسوبات کف مجرای قنات، نسبت داد.

هر دو پروفیل‌های ونر و دوقطبی-دوقطبی، مجرای قنات را به صورت توده‌ای مقاوم نسبت به رسوبات اطراف آن، نشان داده‌اند. اساساً پروفیل‌های ونر و دوقطبی-دوقطبی چندان تفاوتی با هم ندارند و اختلاف را می‌توان به ساختار متفاوت دو آرایش مزبور و وجود نوفه‌هایی که بر روی دو آرایش به صورت متفاوت بر روی اندازه‌گیری‌ها تأثیر کرده‌اند، نسبت داد.

در شکل ۴-۲۴ شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی بر روی این پروفیل، نشان داده شده است. همان‌طور که در مقطع دو بعدی حاصل از مدل سازی وارون داده‌ها (شکل ۴-۲۴ ج) دیده می‌شود، یک ساختار با مقاومت ویژه بالا در ۲۲ متری پروفیل به چشم می‌خورد. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا را احتمالاً مجرای قنات واقع در این قسمت سبب شده است.



شکل ۴-۲۳: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری دوقطبی-دوقطبی به ازاء n های مختلف بر روی پروفیل ۵.



شکل ۴-۲۴: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی برای پروفیل ۵. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

۴-۱-۳- پروفیل ۶

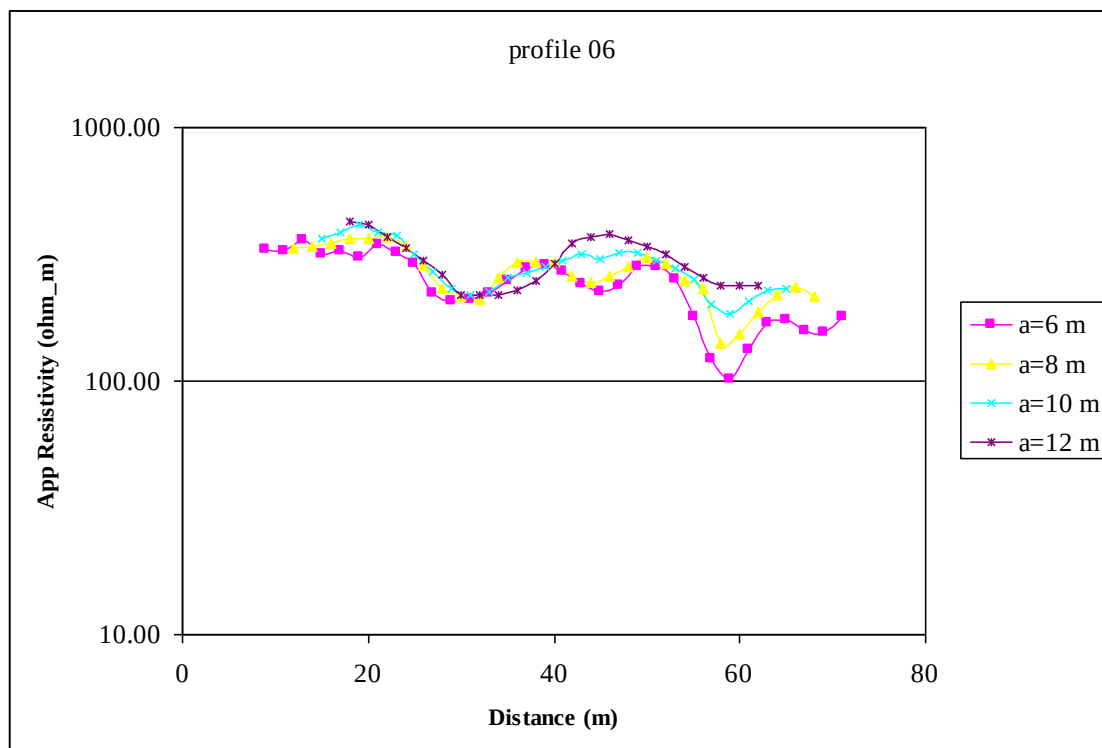
اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه بر روی پروفیل ۶ با استفاده از آرایش ورنر و به ازاء فواصل میان الکترودی ۴، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۲ متر، صورت گرفت. این پروفیل به طول ۸۰ متر در نظر گرفته شد. مجرای قنات آب در محل این پروفیل در عمق تقریبی ۵/۵ متری و در ۳۸ متری از ابتدای پروفیل واقع است.

پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری ورنر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف در شکل ۴-۲۵ به نمایش درآمده است. در پروفیل‌های با فاصله میان الکترودی ۶ و ۸ متری همانند پروفیل‌هایی که قبلاً بررسی شد، در محل عبور مجرای قنات یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا خوبی قابل مشاهده است.

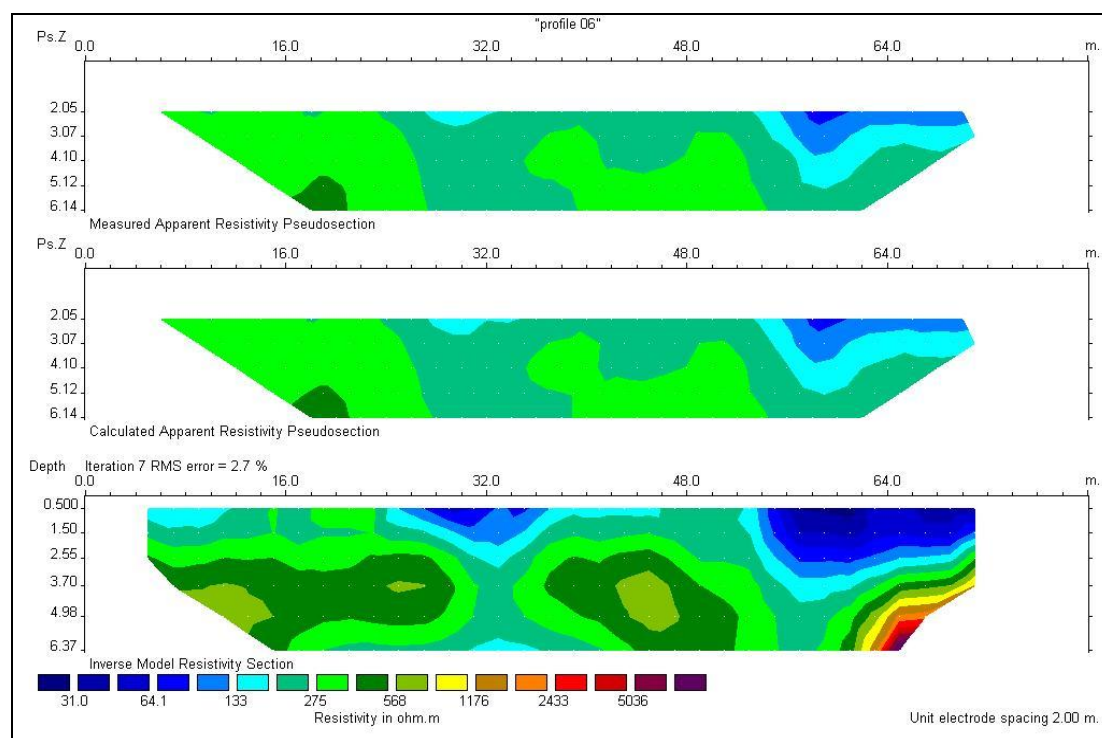
پروفیل با فاصله میان الکترودی ۱۲ متری کاهش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات (در فاصله ۳۸ متری پروفیل) از خود نشان می‌دهد، کاهش مقاومت ویژه در محل این پروفیل را می‌توان به نشت آب از طریق کف مجرای قنات به اعماق پایین‌تر و احتمالاً وجود رس بالاتر در این اعماق نسبت داد. همچنین همان‌طور که شکل ۴-۲۵ نشان می‌دهد، یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا در فاصله ۶۵ متری از طول پروفیل بر روی پروفیل‌های ورنر با فواصل میان الکترودی مختلف قابل مشاهده است. این بی‌هنجاری نیز همانند بی‌هنجاری

مشاهده شده در ۳۹ متری پروفیل ۵ ناشی از وجود مجرای قنات خشک و متروک در این ناحیه می‌باشد. میله‌های این قنات در عکس هوایی منطقه برداشت در شکل ۴-۲ در کنار قنات آب قابل تشخیص است و در انتهای پروفیل‌های برداشتی قرار گرفته است. این امر تأکیدی بر آشکارسازی بهتر قنات‌های خشک نسبت به انواع مرطوب آن در این منطقه است. اثر افزایش مقاومت ویژه در عمق را همانند پروفیل‌های قبلی، می‌توان به وجود روباره‌های رسانا و افزایش میزان رس در طبقات فوقانی خاک نسبت داد. همان‌طور که از شکل ۴-۲۵ دیده می‌شود، در محل قنات بدون آب در ۶۵ متری پروفیل، اثر افزایش مقاومت ویژه نسبت به عمق بسیار شدید تر از سایر قسمت‌های پروفیل می‌باشد. این اثر می‌تواند از وجود رسوبات رسی در سطح، در اثر لای‌روبی متناوب قنات در این قسمت‌ها ناشی شده باشد. این اندازه‌گیری‌ها بر روی قسمت‌های پایین دست قنات صورت گرفته و احتمال وجود رسوبات رسی که توسط آب در مسیر مجرای قنات حمل می‌شوند و در این نواحی نهشته می‌شوند، بیشتر است. نکته قابل توجه در این قسمت از پروفیل (۶۵ متری)، آن است که بیشترین افزایش مقاومت ویژه در پروفیل‌های ۶ و ۸ متری دیده می‌شود. همان‌طور که ذکر شد پروفیل‌های ۶ و ۸ متری، قنات حاوی آب را نیز در ۳۸ متری پروفیل آشکارسازی می‌کنند. این مطلب نشان می‌دهد که مجرای هر دو قنات در عمق یکسانی واقع است. این مطلب تأکیدی بر تغییر مسیر قنات در اثر تخریب مجرای قنات در این نواحی سست و ریزشی است.

در شکل ۴-۲۶ شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به پروفیل ۶ دیده می‌شود. همان‌طور که در مقطع دو بعدی حاصل از مدل سازی وارون (شکل ۴-۲۶ ج)) دیده می‌شود، در ۲۸ تا ۳۸ متری پروفیل و در اعماق بیش از ۶ متر که منطبق بر مسیر مجرای قنات در این ناحیه است، خاک مرطوب در اثر نشت آب قنات به اعماق پایین‌تر (و احتمال وجود رس بالاتر) به صورت یک منطقه با مقاومت ویژه پایین در مقطع مدل‌سازی شده به چشم می‌خورد. همچنین یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا در ۶۵ متری و در عمق تقریبی ۵/۵ تا ۶ متری دیده می‌شود. این امر همانند مقطع حاصل از مدل سازی پروفیل ۵ در شکل ۴-۲۲ مربوط به وجود قنات بدون آب در این ناحیه می‌باشد. لذا می‌توان گفت که برداشت‌های مقاومت ویژه در این نواحی، در آشکارسازی قنات‌های خشک موفق‌تر از انواع حاوی آب آن عمل کرده است. این اثر را می‌توان به بزرگتر بودن احتمالی ابعاد مجرای قنات خشک در اثر ریزش رسوبات و مقاومت ویژه نزدیک رسوبات منطقه به آب قنات نسبت داد.



شکل ۴-۲۵: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۶.



شکل ۴-۲۶: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۶. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

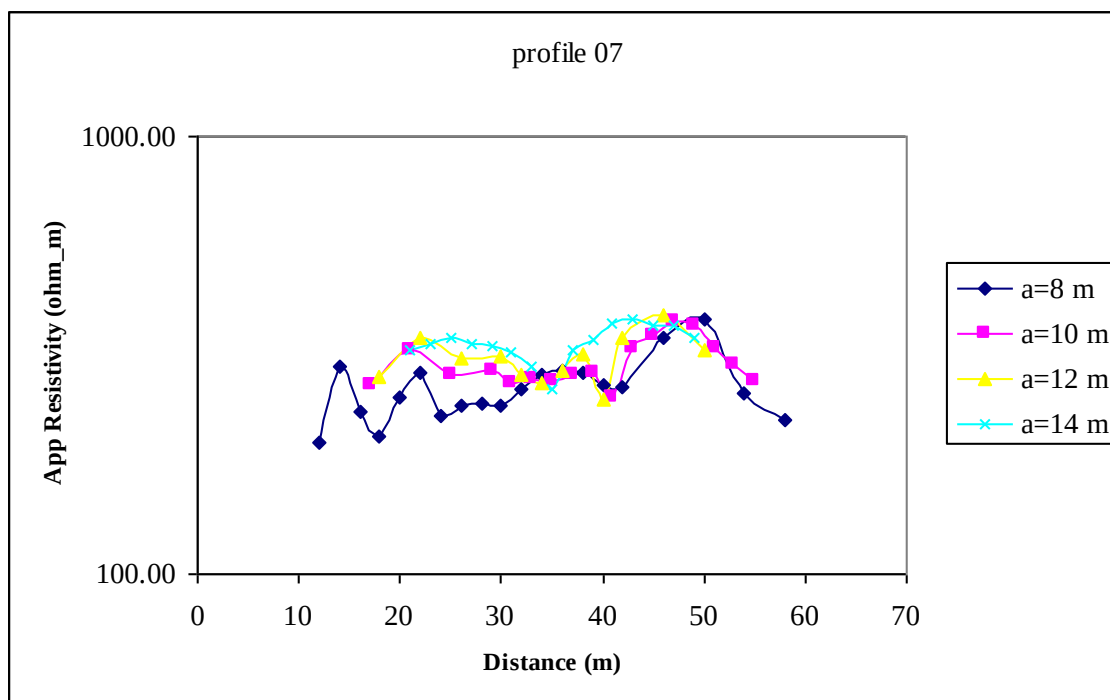
۴-۱-۴-۴-۷ پروفیل ۷

پروفیل ۷ مقاومت ویژه به طول ۷۰ متر بر روی قنات آب در نظر گرفته شد. برداشت‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ونر و به ازاء فواصل میان الکترودی ۸، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ متر بر روی این پروفیل صورت گرفت. در شکل ۴-۲۷ پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری ونر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف به نمایش در آمده است.

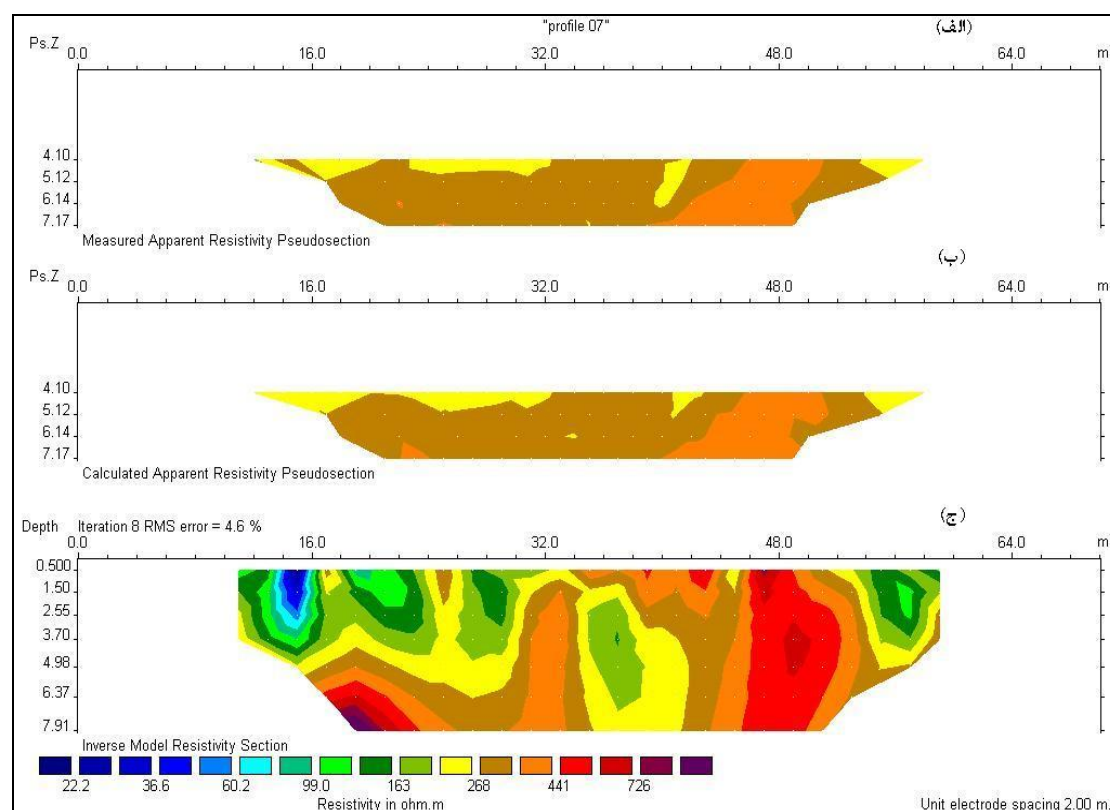
مجرای قنات در محل این پروفیل در فاصله تقریبی ۳۵ متری و در عمق تقریبی ۶/۵ متری واقع است. همان‌طور که از روی پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری در شکل ۴-۲۷ دیده می‌شود، افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات، تنها در پروفیل با فاصله میان الکترودی ۸ متری دیده می‌شود. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه بالا نسبت به پروفیل‌هایی که تاکنون بررسی شد، ضعیف‌تر می‌باشد. این اثر از واقع شدن مجرای قنات در اعماق بیشتر ناشی شده است.

در شکل ۴-۲۷ پروفیل‌های با فاصله میان الکترودی ۱۲ و ۱۴ متری در محل عبور مجرای قنات، یک کاهش مقاومت ویژه نسبت به اطراف نشان می‌دهند. این اثر را همانند پروفیل‌های قبل، به نشت آب قنات از کف آن به اعماق پایین‌تر و همچنین حضور احتمالی رسوبات ریزدانه رسی در رسوبات زیر مجرای قنات، نسبت می‌دهیم. روند افزایش مقاومت ویژه نسبت به عمق در این پروفیل نیز به چشم می‌خورد ولی در مقایسه با پروفیل‌های ابتدایی این اثر کمتر است. این اثر ناشی از کاهش میزان رسوبات رسی در قسمت‌های بالا دست منطقه برداشت می‌باشد.

در شکل ۴-۲۸ شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به این پروفیل نشان داده شده است. همان‌طور که از مقطع دو بعدی حاصل از مدل سازی وارون (شکل ۴-۲۸ ج) دیده می‌شود، یک منطقه با مقاومت ویژه پایین در مقایسه با رسوبات اطراف به چشم می‌خورد. البته ابعاد آن در مقایسه با ابعاد مجرای قنات بسیار بزرگتر بوده و از ۲ تا ۶/۵ متری گسترش دارد. تعداد نسبتاً پایین داده‌های برداشتی در این پروفیل، بررسی‌های جزئی‌تر را محدود می‌کند. همچنین به نظر می‌رسد که این تعداد داده برای تهیه مقطع مدل سازی وارون مناسب نمی‌باشد.



شکل ۴-۲۷: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۷.

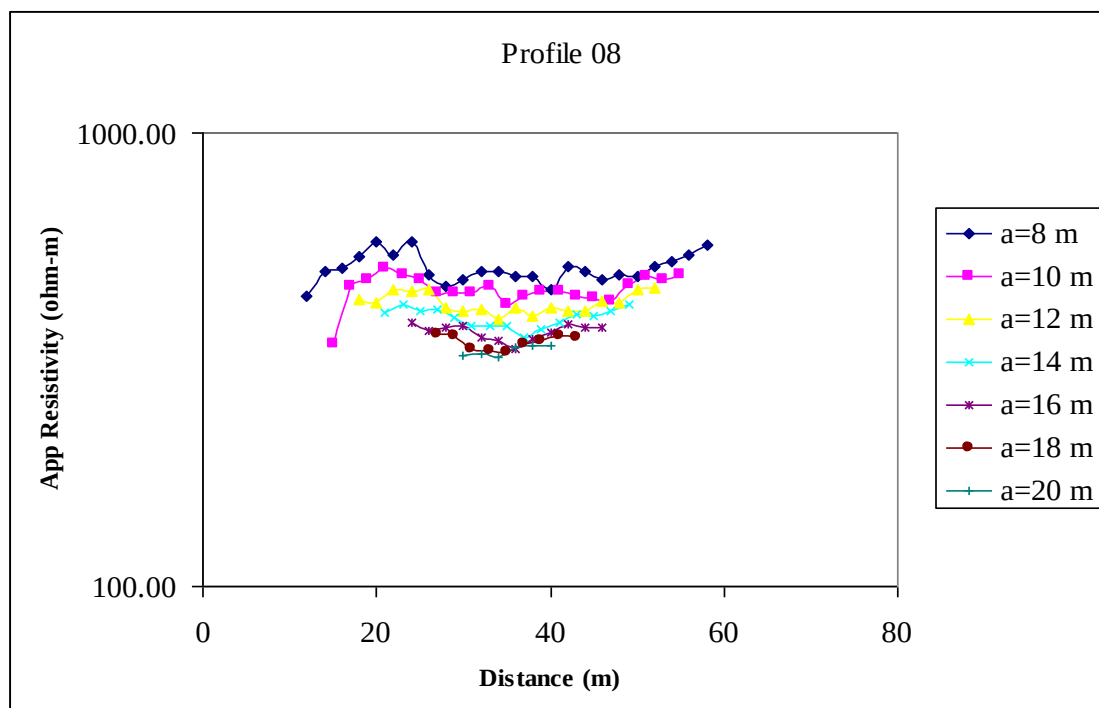


شکل ۴-۲۸: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۷. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل‌سازی وارون (ج).

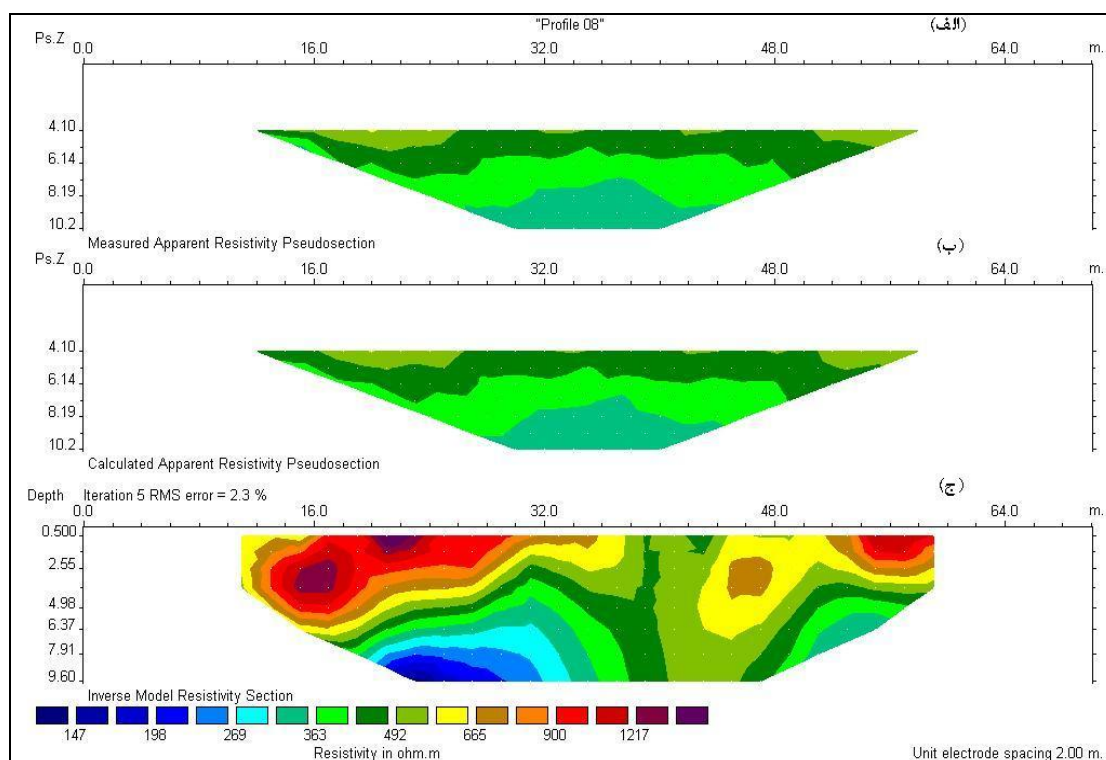
پروفیل ۸ به طول ۷۰ متر بر روی قنات آب در نظر گرفته شد. اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه بر روی این پروفیل نیز به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش و نر و به ازاء فواصل میان الکترودی ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر صورت گرفت. لذا تعداد داده‌های برداشتی در این پروفیل برای بدست آوردن یک مدل یا مقطع دو بعدی مقاومت ویژه از ساختارهای زیرسطحی مناسب به نظر می‌رسد. مجرای قنات در محل این پروفیل در فاصله ۳۰ تا ۳۲ متری و در عمق تقریبی ۷/۵ تا ۸ متر واقع شده است.

در شکل ۴-۲۹ پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر و به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف نشان داده شده است. مسئله قابل توجه در این پروفیل برخلاف پروفیل‌های قبل که تا کنون بررسی شد، روند عمومی کاهش مقاومت ویژه نسبت به عمق (با افزایش فاصله الکترودی) می‌باشد. این مسئله را می‌توان به عدم وجود روباره رسانا و کاهش میزان رس در طبقات فوقانی خاک نسبت داد. در محل این پروفیل نهشته‌های ماسه‌ای در سطح زمین به خوبی قابل تشخیص است. همانند تمام پروفیل‌های مقاومت ویژه که تا کنون بررسی شد، افزایش مقاومت ویژه در فاصله ۳۲ متری ناشی از هوا و احتمالاً بتن درون مجرای قنات در پروفیل‌های با فواصل میان الکترودی ۱۰ و ۱۲ متری قابل مشاهده است. این بی‌هنجاری کوچک که ما آن را از پروفیل‌های نزدیک مظهر قنات تعقیب کرده‌ایم، شاید با در نظر گرفتن این پروفیل به صورت مجزا، قابل آشکارسازی نباشد. دلیل کوچک بودن این بی‌هنجاری، کوچک بودن ابعاد مجرای قنات نسبت به عمق دفن آن می‌باشد. دلیل دوم که در مقایسه با دلیل اول تأثیر کمتری بر روی پروفیل‌های مقاومت ویژه دارد، کوچکتر بودن اختلاف یا تباین مقاومت ویژه بین رسوبات در برگیرنده مجرای قنات که دارای مقاومت ویژه بالایی هستند، در مقایسه با مقاومت ویژه هوا و بتون داخل مجرای قنات است. در ابتدای پروفیل‌های با فاصله میان الکترودی ۸ و ۱۰ متر، کاهش مقاومت ویژه احتمالاً در اثر وجود رسوبات ریزدانه رسی در عمق کم می‌باشد.

در شکل ۴-۳۰ شبه مقاطع و مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به این پروفیل نشان داده شده است.



شکل ۴-۲۹: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۸.



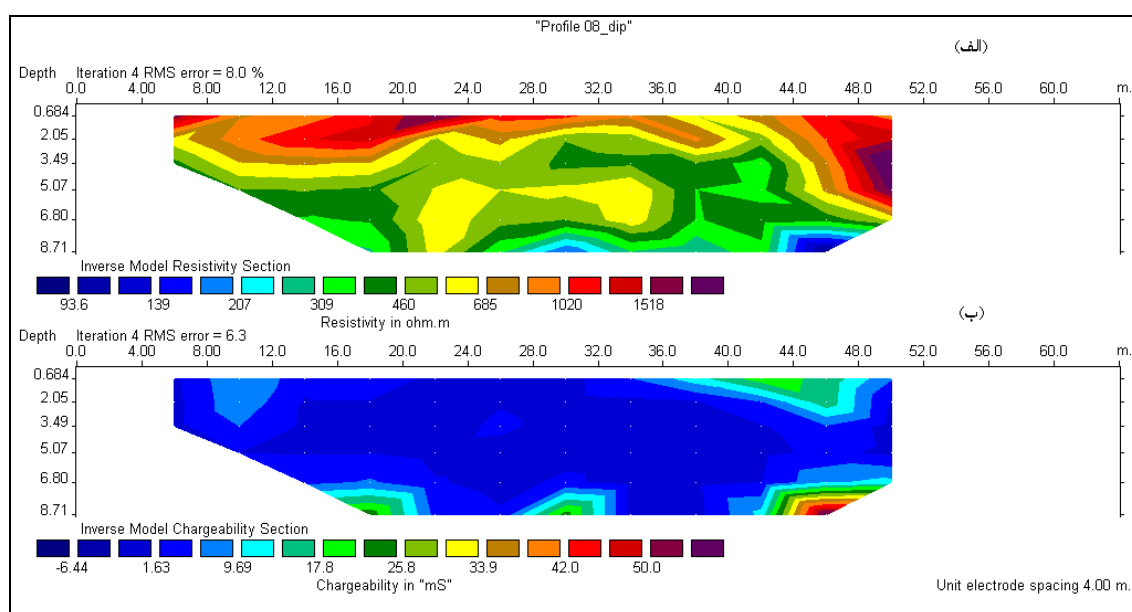
شکل ۴-۳۰: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۸. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

در مقطع دوبعدی حاصل از مدل سازی وارون (شکل ۴-۳۰ ج)) دو بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین یکی در فاصله ۲۰ تا ۳۴ متر و دیگری در فاصله ۴۸ تا ۵۸ متری دیده می‌شود. اثر مقاومت ویژه بالای رسوبات ماسه‌ای به خوبی در سطح مشخص است.

برای ارائه یک تفسیر منطقی و همچنین بررسی نتایج مقاومت ویژه بدست آمده توسط آرایش ونر، برداشت‌های مقاومت ویژه و IP با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی بر روی این پروفیل صورت گرفت. این اندازه‌گیری‌های دوقطبی-دوقطبی با فاصله دوقطبی‌های برابر ۴ متر و همچنین با n های برابر ۱ تا ۸ صورت گرفت. مقاطع مقاومت ویژه و بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون بر روی این پروفیل با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی، توسط نرم افزار Res2dinv در شکل ۴-۳۱ نشان داده شده است. در مقطع مدل سازی شده مقاومت ویژه (شکل ۴-۳۱ الف)) سه بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین در اعماق تقریبی بیشتر از ۷ متر به ترتیب در مکان‌های ۱۸، ۳۰ و ۴۴ متری پروفیل، قابل تشخیص است. این نواحی با مقاومت ویژه پایین منطبق بر نواحی بی‌هنجار IP با مقدار بارپذیری بالا می‌باشند. مقدار این بارپذیری نسبتاً بالا است (بین ۵۰-۳۰ میلی ثانیه) و می‌توان این بارپذیری بالا را به اثر IP غشائی نسبتاً بالا در اثر وجود رسوبات رسی قابل توجه در این مناطق نسبت داد. بی‌هنجاری مرکزی بر روی مقاطع مدل سازی شده مقاومت ویژه و بارپذیری (با مقاومت ویژه پایین و مقدار بارپذیری بالا) منطبق بر مجرای قناتی است که در عمق تقریبی ۷/۵ متر واقع است. مقاومت ویژه پایین و مقدار بارپذیری بالا در این ناحیه را می‌توان ناشی از دو عامل دانست: عامل اول، نشت آب از کف و دیواره مجرای قنات به اطراف و اعماق پایین‌تر که باعث کاهش مقاومت ویژه در این ناحیه در مقایسه با رسوبات اطراف مجرای قنات شده است. به همین ترتیب افزایش بارپذیری ناشی از مرطوب بودن خاک (در واقع تأثیر املاح آب [۳۵]) اطراف مجرای قنات در مقایسه با رسوبات خشک اطراف مجرای قنات می‌باشد. اما عامل دوم که مهم‌تر از عامل اول است را می‌توان به وجود رس در این نواحی نسبت داد. منطقه برداشت داده‌ها نزدیک به مظهر قنات می‌باشد. از این رو احتمال وجود رسوبات رسی در مجرای قنات و حتی در رسوبات اطراف آن، در اثر جریان آب در مسیر حرکت و انتقال رسوبات ریزدانه رسی به محل، وجود دارد. از این‌رو در مقاطع مدل سازی شده مقاومت ویژه و بارپذیری، این بی‌هنجاری قابل مشاهده است. دو بی‌هنجاری دیگر در فواصل ۱۸ و ۴۶ متری پروفیل احتمالاً از افزایش میزان رس محلی خاک در این مناطق، ناشی شده است.

در مقطع مدل سازی شده مقاومت ویژه در شکل ۴-۳۱ الف))، نهشته‌های ماسه‌ای در سطح مقطع مدل سازی شده به صورت روباره‌ای با مقاومت ویژه بالا نمایش داده شده‌اند. در مقایسه مقاطع مقاومت ویژه بدست آمده

توسط دو آرایش وئر و دوقطبی-دوقطبی به نظر می‌رسد که آرایش دوقطبی-دوقطبی در آشکارسازی مسیر مجرای قنات به دلیل قدرت تفکیک جانبی بالاتر [۲۳]، موفق‌تر عمل کرده است. دو بی‌هنجاری که در ۱۸ و ۳۰ متری مقاطع مدل سازی شده مقاومت ویژه و بارپذیری آرایش دوقطبی-دوقطبی به صورت مجزا دیده می‌شوند، در مقطع مدل سازی شده آرایش وئر (شکل ۴-۳۰ ج)) به صورت یک بی‌هنجاری پیوسته و بزرگتر دیده می‌شوند. این مطلب تأکیدی بر قدرت تفکیک جانبی بهتر آرایش دو قطبی-دوقطبی در مقایسه با آرایش وئر می‌باشد.



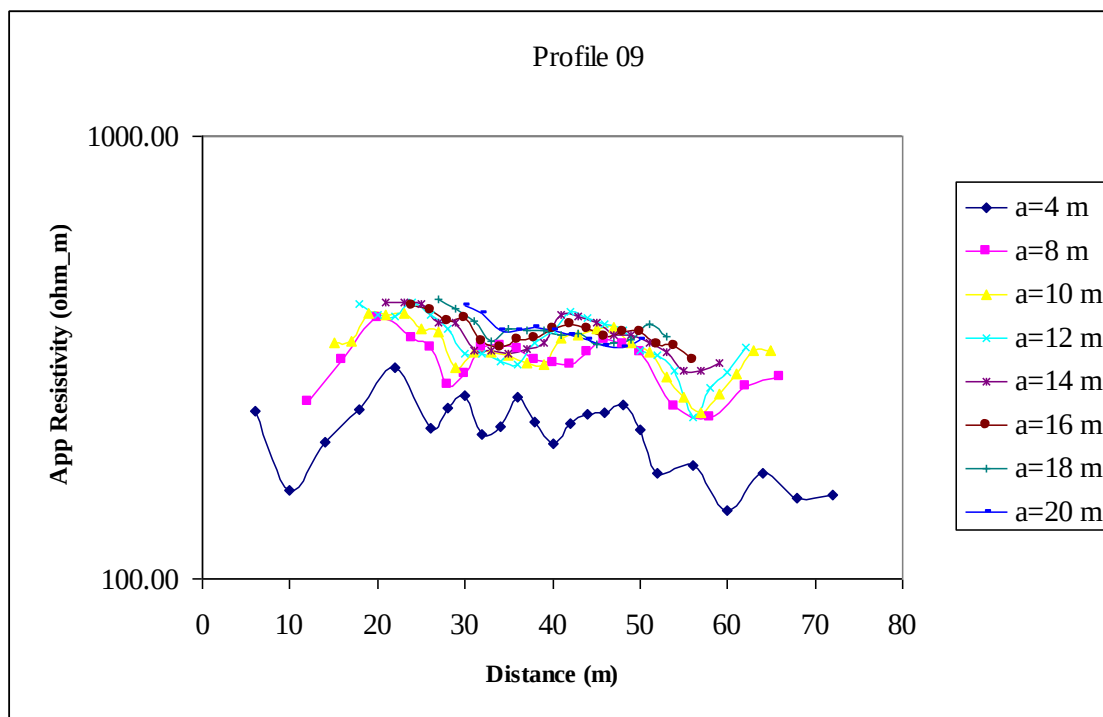
شکل ۴-۳۱: مقطع دو بعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون (الف) و مقطع دو بعدی بارپذیری حاصل از مدل سازی وارون (ب) با استفاده از آرایش دوقطبی-دوقطبی بر روی پروفیل ۸.

۴-۱-۶-۴ پروفیل ۹

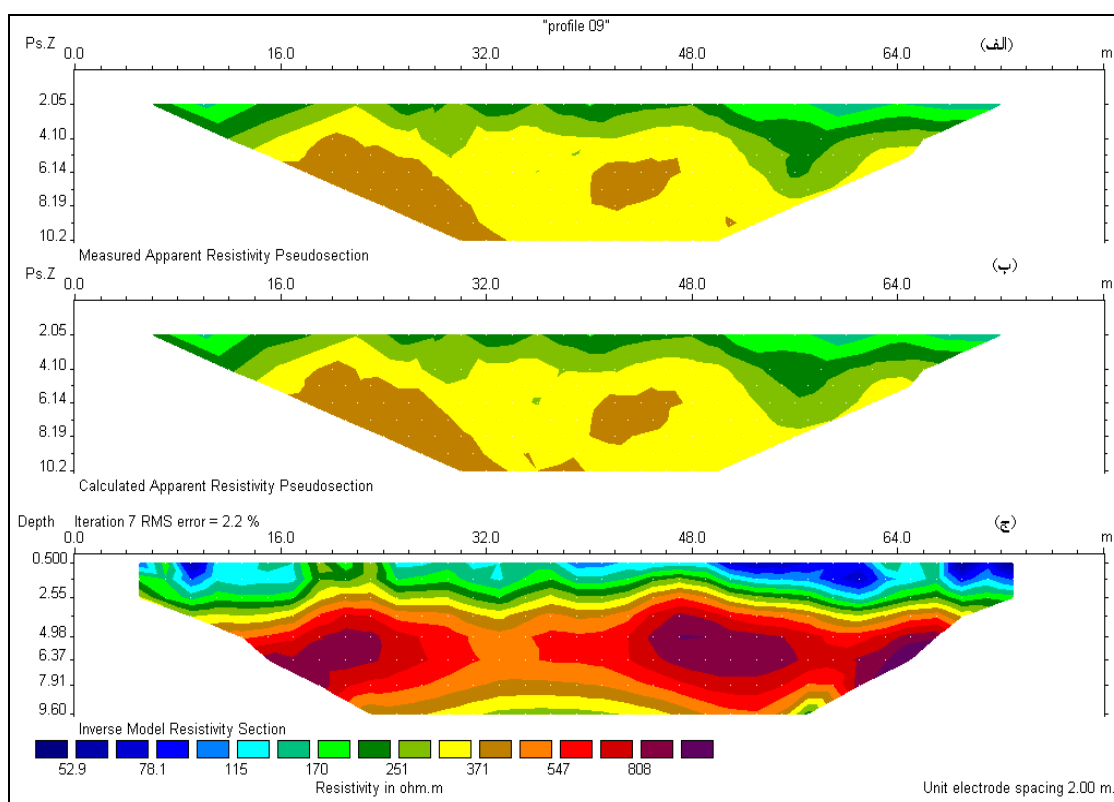
اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه بر روی پروفیل ۹ به روش پروفیل‌زنی و با استفاده از آرایش وئر و به ازاء فواصل میان الکترودی ۴، ۸، ۱۰، ۱۲، ۱۴، ۱۶، ۱۸ و ۲۰ متر صورت گرفت. این پروفیل به طول ۸۰ متر و در حدود ۸۰ متر بالاتر از (در غرب) پروفیل ۸ بر روی قنات آب در نظر گرفته شد. مجرای قنات آب در محل این پروفیل در فاصله ۳۸ متری و در عمقی کمتر از ۹ متر واقع است.

در شکل ۴-۳۲ پروفیل‌های مقاومت ویژه و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف نشان داده شده است. افزایش مقاومت ویژه در محل عبور مجرای قنات که در تمام پروفیل‌های قبلی قابل مشاهده بود، در این پروفیل به چشم نمی‌خورد. علاوه بر افزایش عمق دفن مجرای قنات نسبت به ابعاد آن، از دیگر دلایل عدم آشکارسازی آن می‌توان به ضعف آرایش و نر در آشکارسازی اهداف عمیق اشاره کرد [۱۳]. پروفیل با فاصله میان الکترودی ۴ متر عموماً از تمام پروفیل‌های دیگر (با فواصل میان الکترودی بیشتر)، مقاومت ویژه کمتری را نشان می‌دهد. مقایسه مقادیر مقاومت ویژه این پروفیل (با فاصله میان الکترودی ۴ متر) و پروفیل‌های با فواصل میان الکترودی بزرگتر (مربوط به اعماق بیشتر) نشان می‌دهد که احتمالاً میزان رس به سمت اعماق بیشتر، کاهش می‌یابد. از طرف دیگر این پروفیل روند ناهنجارتری نسبت به پروفیل‌های با فاصله میان الکترودی بزرگتر از خود نشان می‌دهد. این امر ناشی از تغییرات نسبتاً شدید مقاومت ویژه در اثر عوامل سطحی و کم عمق (عموماً رساناتر) می‌باشد. در اینجا نباید نقش رسوبات ناشی از حفاری قنات در سطح را نادیده گرفت.

در شکل ۴-۳۳ شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به این پروفیل دیده می‌شود. در فاصله ۳۶ تا ۳۸ متری در مقطع دو بعدی حاصل از مدل سازی وارون (شکل ۴-۳۳ ج) در عمق بیشتر از ۹ متر یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین به چشم می‌خورد. این بی‌هنجاری احتمالاً از وجود خاک مرطوب در اثر نشت آب قنات از کف و دیواره‌های مجرای قنات و حتی وجود رسوبات رسی در این نواحی، ناشی شده است. نواحی با مقاومت ویژه بالا در میانه مقطع مدل سازی شده را آبرفت‌های دانه درشت با جورشدگی ضعیف، که حتی در بین آنها قلوه سنگ و تخته سنگ نیز دیده می‌شود، سبب شده‌اند. نهشته‌های حاصل از حفاری قنات که در حاشیه میله‌های قنات برای جلوگیری از تخریب و آلوده شدن آب توسط سیلاب‌ها و عوامل محیطی به دور میله‌های قنات انباشته شده‌اند، وجود چنین آبرفت‌هایی را تأیید می‌کند.



شکل ۴-۳: پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی پروفیل ۹.



شکل ۴-۳: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه پروفیل ۹. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه‌گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل‌سازی وارون (ج).

همان‌طور که قبلاً ذکر شد خاک برداری نزدیک مظهر قنات در فاصله چند متری از پروفیل ۱ مقاطع قائمی از رسوبات منطقه در اختیارمان قرار داده است. آبرفت‌های دانه درشت با جورشدگی ضعیف در زیر آبرفت‌های دانه ریز که دارای میزان رسوبات رسی و سیلتی بسیار بالایی هستند، به خوبی قابل تشخیص است. این مطلب نیز تأکیدی بر افزایش مقاومت ویژه در قسمت‌های میانی مقطع مدل سازی شده این پروفیل در شکل ۴-۳۳ (ج) می‌باشد. رسوبات ریزدانه حاوی میزان رسوبات رسی قابل توجه هستند و در روی رسوبات دانه درشت ذکر شده قرار گرفته‌اند. این رسوبات به صورت یک لایه با مقاومت ویژه پایین در سطح و عمق کم و در تمام طول پروفیل در شکل ۴-۳۳ (ج) قابل مشاهده می‌باشند.

۴-۴-۲- اندازه‌گیری‌های GPR بر روی پروفیل‌های میانی تا انتهایی

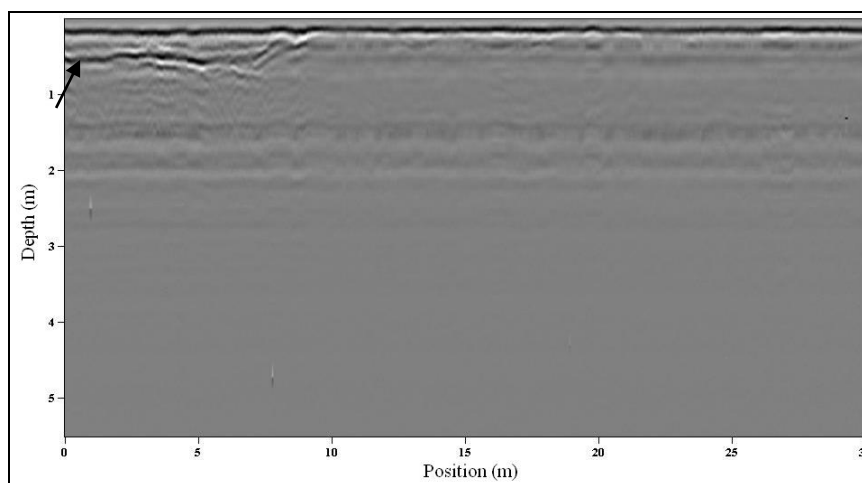
به دلیل واقع شدن مجرای قنات آب در اعماق بیشتر از عمق نفوذ فرکانس مورد استفاده، پروفیل‌های GPR پاسخی از مجرای قنات آب نشان نمی‌دهند. مقاطع عمقی داده‌های GPR برای پروفیل‌های ۴ الی ۹ در شکل‌های ۴-۳۴ تا ۴-۳۹ آورده شده است. این مقاطع با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC به ازاء ضریب اتلاف ۵ و مقدار حداکثر بهره ۳۰۰ به دست آمده‌اند. همچنین برای بدست آوردن مقاطع عمقی از سرعت متوسط ۰/۱ متر بر نانوثانیه، بهره برده‌ایم.

همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شد، به دلیل محدودیت دستگاه GPR مورد استفاده در توپوگرافی‌های ناهموار، پروفیل‌های GPR از پروفیل‌های مقاومت ویژه متناظر کوتاه‌تر در نظر گرفته شد. از آنجا که پاسخی از اعماق بیش از چند متر در پروفیل‌های GPR دیده نمی‌شود، برای مقایسه بهتر تنها ۵/۵ متر بالایی مقاطع GPR را نمایش داده‌ایم.

در شکل ۴-۳۴، یک بی‌هنجاری افقی پیوسته واقع در عمق ۰/۵ متری دیده می‌شود. این بی‌هنجاری که از ابتدای پروفیل تا فاصله ۷ متری آن امتداد می‌یابد را سنگ ریزه‌های شنی که برای ساخت جاده از آنها استفاده شده، سبب شده‌اند. این جاده تقریباً در امتداد قنات آب بوده و همان‌طور که در شکل ۴-۲ دیده می‌شود، جزئی از پروفیل‌های اندازه‌گیری است. این بی‌هنجاری به مقدار خفیف‌تری نیز در ابتدای پروفیل ۵ در شکل ۴-۳۵ دیده می‌شود.

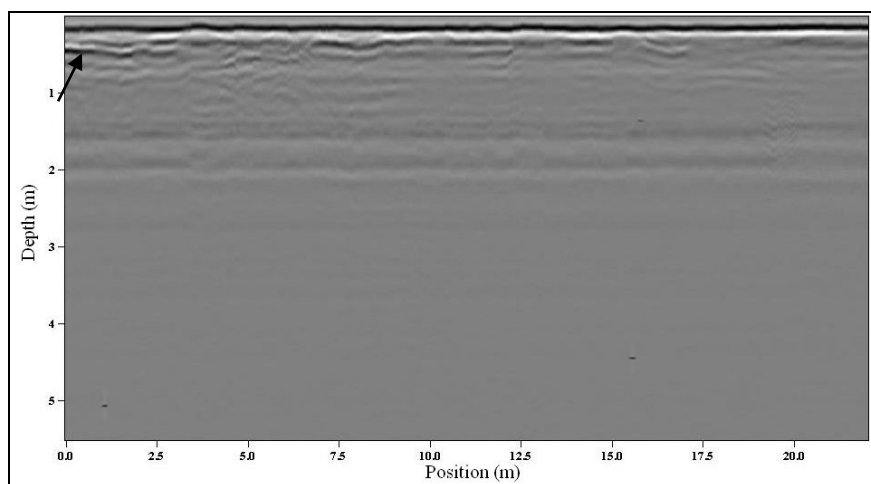
همان‌طور که از این شکل‌ها دیده می‌شود، به دلیل حضور رسوبات ریزدانه با مقاومت ویژه پایین در سطح، مقاطع GPR، پاسخی از توده‌های زیرسطحی نشان نمی‌دهند. و امواج GPR به شدت در این محیط‌ها اتلاف می‌شوند. تنها در شکل ۴-۳۸ که مربوط به پروفیل ۸ می‌باشد، اثراتی از لایه‌بندی خاک در ساختارهای نزدیک سطح دیده می‌شود. به دلیل مقاومت ویژه بالای رسوبات سطحی در این نواحی، این اثرات قابل مشاهده است. مقاطع مدل سازی شده مقاومت ویژه در شکل‌های ۴-۳۰ و ۴-۳۱ این مطلب را تأیید می‌کنند.

بی‌هنجاری‌هایی که در شکل‌های ۴-۳۸ و ۴-۳۹ با علامت فلش مشخص شده و از سطح تا اعماق مقاطع امتداد یافته‌اند، پاسخ از ساختارهای زیرسطحی نمی‌باشند. این اثرات ناشی از عدم جفت‌شدگی^{۱۱۱} مناسب آنتن GPR با زمین (عدم قرارگیری کامل دستگاه به طور صاف و تراز در روی سطح زمین) در اثر وجود موانع طبیعی نظیر بوته‌ها در مسیر دستگاه می‌باشد. چنین اثراتی در هنگام برداشت داده‌ها بایستی لحاظ شوند تا به اشتباه به عنوان پاسخ از توده‌های زیرسطحی، تفسیر نگردند.

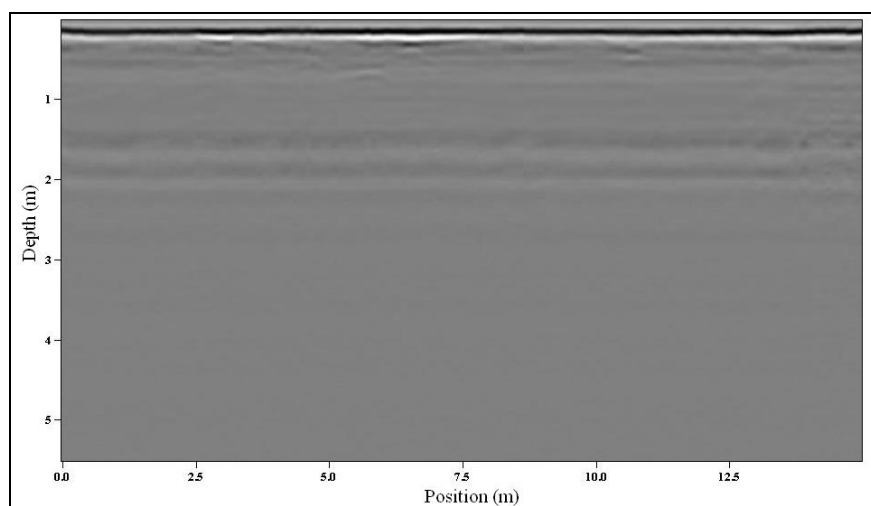


شکل ۴-۳۴: مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.

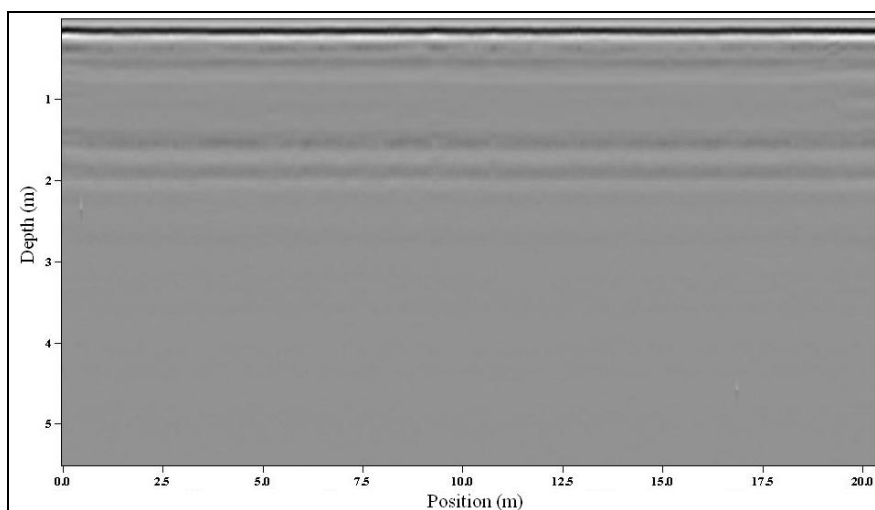
^{۱۱۱} Coupling



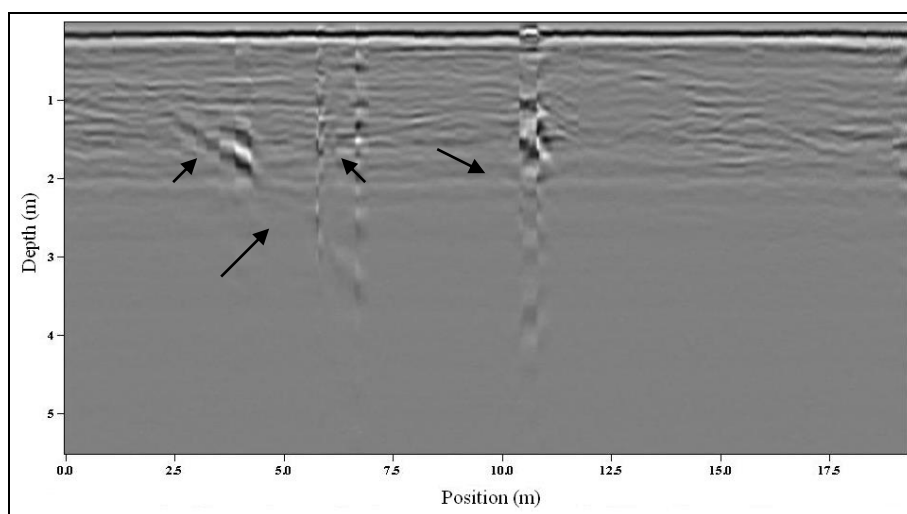
شکل ۴-۳۵: مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.



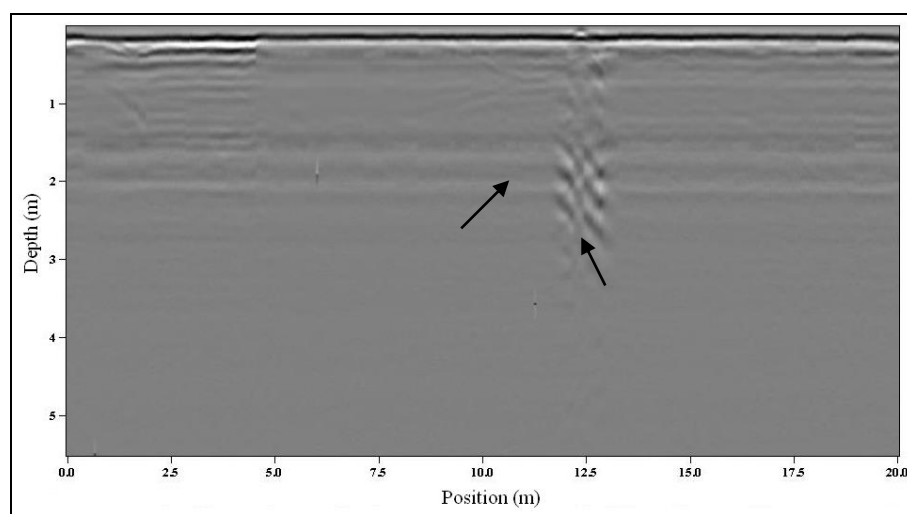
شکل ۴-۳۶: مقطع عمقی پروفیل ۶ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.



شکل ۴-۳۷: مقطع عمقی پروفیل ۷ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.



شکل ۴-۳۸: مقطع عمقی پروفیل ۸ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.



شکل ۴-۳۹: مقطع عمقی پروفیل ۹ با اعمال فیلتر Dewow و بهره SEC.

فصل پنجم

اندازه‌گیری بر روی لوله‌های مدفون

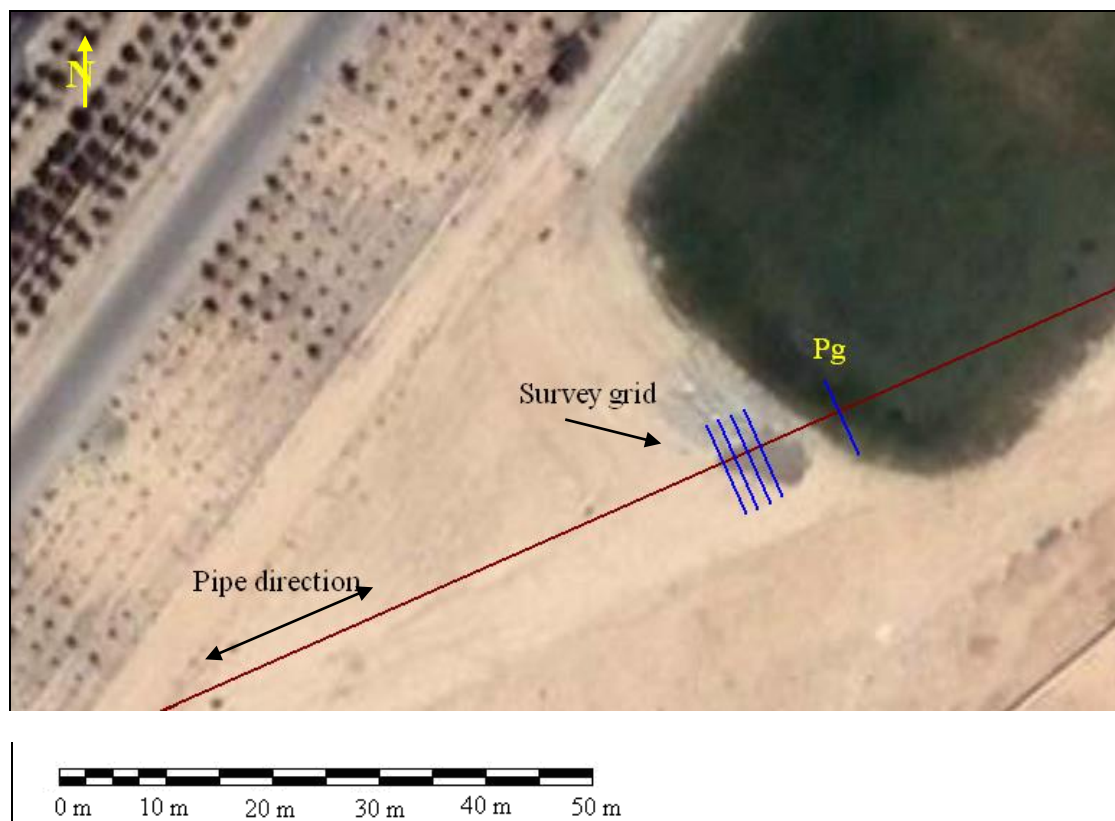
از آنجا که در آشکارسازی قنات آب نتایج مورد نظر حاصل نشد، اندازه‌گیری‌های GPR برای آشکارسازی لوله‌های مدفون در خاک نیز صورت پذیرفت. این لوله‌ها در محوطه زمین‌های داخل دانشگاه صنعتی شاهرود واقع اند.

۵-۱- اندازه‌گیری بر روی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی

۵-۱-۱- اندازه‌گیری‌های GPR

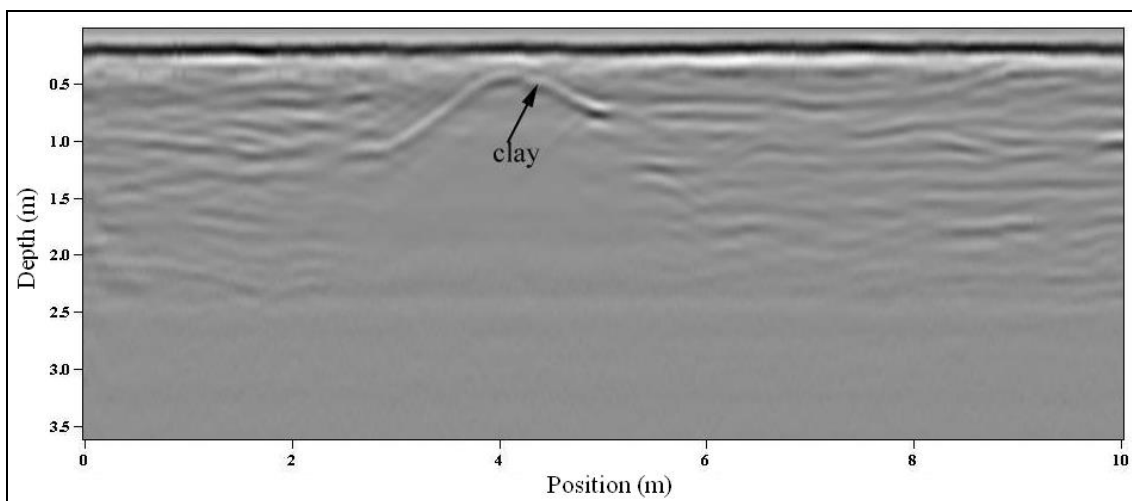
این اندازه‌گیری بر روی خط اصلی انتقال فرآورده‌های نفتی ری-شاهرود صورت پذیرفت. منطقه برداشت داده‌ها مابین زمین چمن فوتبال دانشگاه و دانشکده علوم انسانی قرار دارد. همچنین این منطقه به فاصله ۱۰ متر از زمین چمن فوتبال و در سمت غرب آن واقع است. لوله فولادی که اندازه‌گیری‌ها بر روی آن صورت گرفت، دارای قطر ۲۲ اینچ بوده و به منظور انتقال فرآورده‌های نفتی تعبیه شده است. این لوله در قسمتی از مسیر خود، از داخل دانشگاه صنعتی شاهرود عبور می‌کند.

در این اندازه‌گیری، داده‌های GPR به شیوه‌ای متفاوت اکتساب شدند. بدین ترتیب که داده‌ها در یک شبکه منظم، به صورت ۴ پروفیل موازی به طول ۱۰ متر و به فاصله ۲ متر از یکدیگر، عمود بر امتداد لوله برداشت شدند. محل تقریبی این پروفیل‌ها و همچنین امتداد تقریبی لوله در شکل ۵-۱ به نمایش در آمده است.

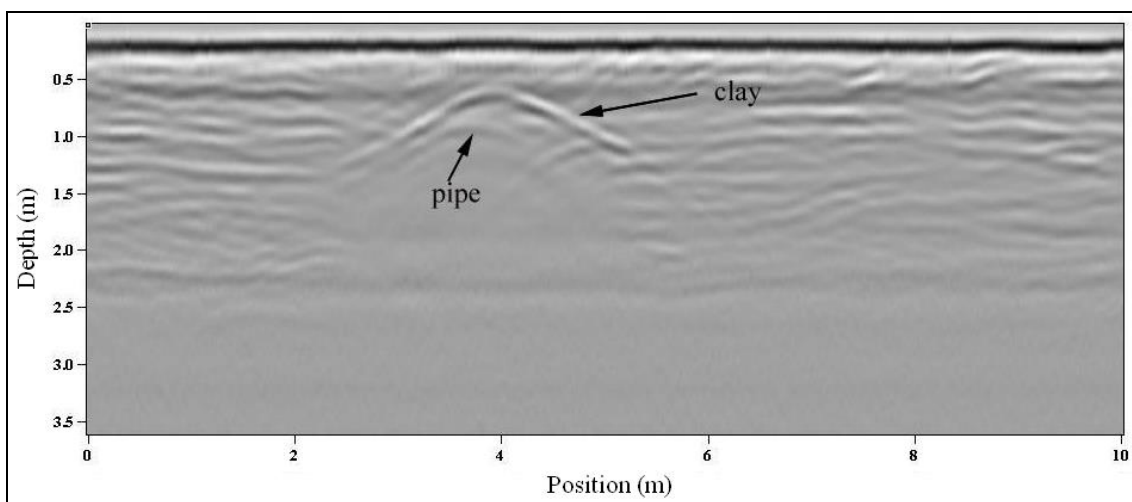


شکل ۵-۱: عکس هوایی منطقه برداشت به همراه پروفیل‌های برداشتی و امتداد تقریبی لوله [۴۲].

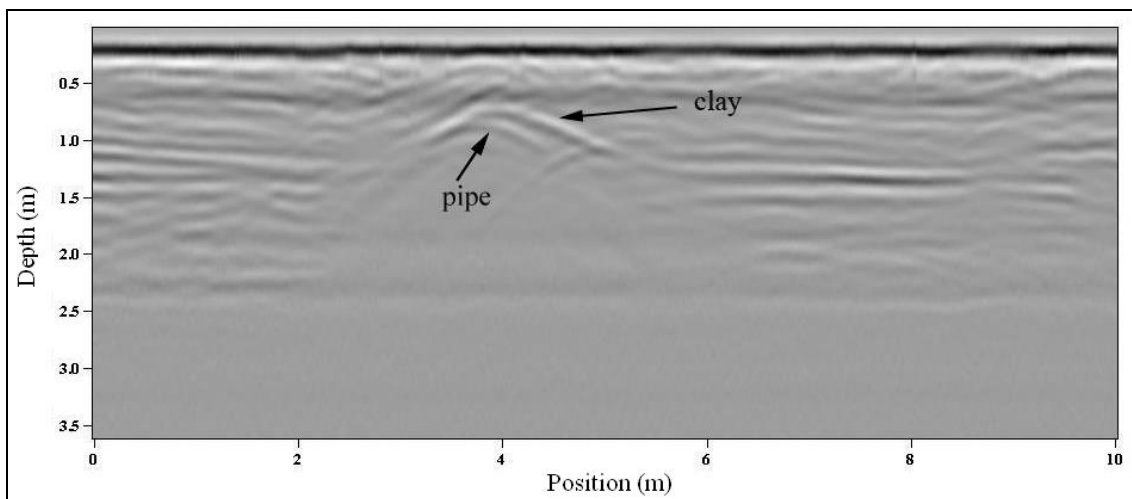
در شکل‌های ۵-۲ الی ۵-۵، مقاطع عمقی داده‌های GPR با استفاده از سرعت ۰/۱۲ متر بر ثانیه برای ۴ پروفیل مذکور نشان داده شده است. تمامی مقاطع با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC به ازاء ضریب اتلاف ۳ و مقدار حداکثر بهره ۱۰۰ بدست آمده است. همچنین برای حذف نوفه‌های فرکانس بالای ناشی از اعمال بهره مورد استفاده بر روی داده‌ها، از فیلتر پایین گذر به ازاء فرکانس قطع ۶۲۹ مگاهرتز، استفاده شده است. امواج GPR به سرعت در این محیط اتلاف می‌شوند. از این‌رو نسبت سیگنال به نوفه از پاسخ‌های ناشی از اهداف عمیق‌تر، پایین است. اعمال بهره مذکور بر روی داده‌ها، نوفه‌ها را برجسته می‌کند. برای حذف این نوفه‌های فرکانس بالا از روی داده‌ها، از فیلتر پایین گذر مزبور استفاده شده است.



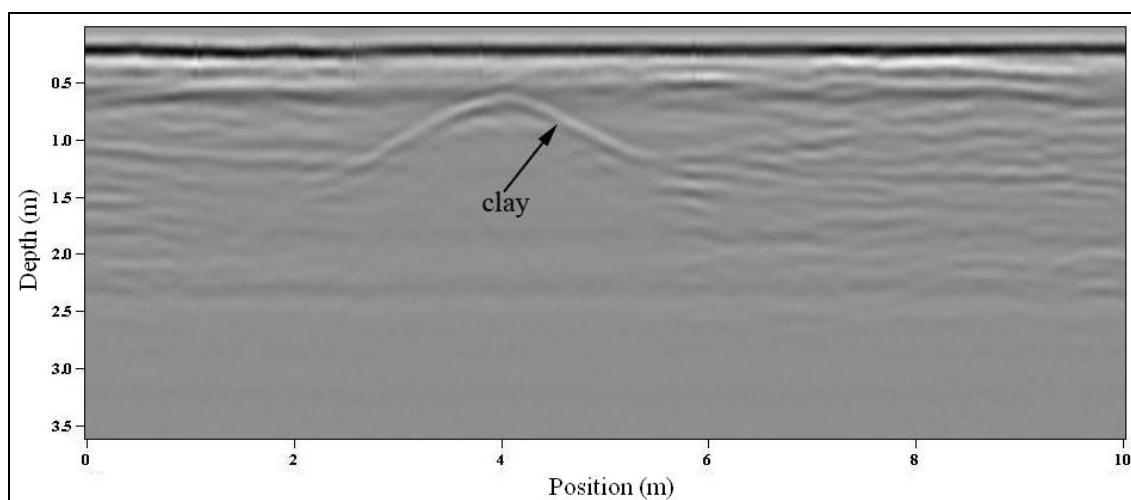
شکل ۵-۲: مقطع عمقی پروفیل صفر، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر.



شکل ۵-۳: مقطع عمقی پروفیل ۱، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر.



شکل ۴-۵: مقطع عمقی پروفیل ۲، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر.



شکل ۵-۵: مقطع عمقی پروفیل ۳، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین گذر.

در تمامی مقاطعی که در شکل‌های ۲-۵ الی ۵-۵ به نمایش درآمده‌اند، یک بی‌هنجاری قابل توجه تاکدیسی (سه‌می) شکل در ۴ متری پروفیل قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری تاکدیسی شکل از آنجا که شباهت زیادی به هذلولی‌های پراش دارد، ممکن است به اشتباه پاسخ ناشی از لوله فلزی در این عمق تفسیر شود. این بی‌هنجاری احتمالاً از وجود رسوبات ریزدانه (رسی‌ها، لای‌ها و غیره) که برای حفاظت از لوله روی آن انباشته می‌کنند، ناشی شده است. به دلیل قطر نسبتاً قابل توجه لوله مدفون، این رسوبات شکل تاکدیسی به خود گرفته‌اند. در ادامه خواهیم دید که احتمال رسی و سیلتی بودن این رسوبات بیشتر از ماسه‌ای بودن آنها است.

برای نمایش بهتر جزئیات در این شکل‌ها، از اعمال پردازش مهاجرت بر روی داده‌های GPR خودداری شده است. از این رو این بی‌هنجاری تاکدیسی شکل گسترده‌تر و پهن‌تر از اندازه واقعی خود دیده می‌شود [۱۹]. در مقاطع مزبور از واژه clay برای نمایش این بی‌هنجاری استفاده شده است. در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵، یک بی‌هنجاری هذلولی شکل در زیر بی‌هنجاری تاکدیس شکل به چشم می‌خورد. این هذلولی پاسخ لوله فلزی در این عمق می‌باشد و از واژه pipe برای نمایش آن استفاده شده است. دنباله‌های این هذلولی به دلیل حضور نهشته‌های پر اتلاف رسی در اطراف لوله به خوبی دیده نمی‌شود. در محل پروفیل ۲ در شکل ۴-۵ که ضخامت رسوبات رسی در بالای لوله به کمترین مقدار خود می‌رسد، اثر لوله به نسبت از پروفیل ۱ در شکل ۳-۵، واضح‌تر دیده می‌شود. در محل پروفیل ۱ که میزان رسوبات رسی در بالای لوله بیشتر از مقدار آن در محل

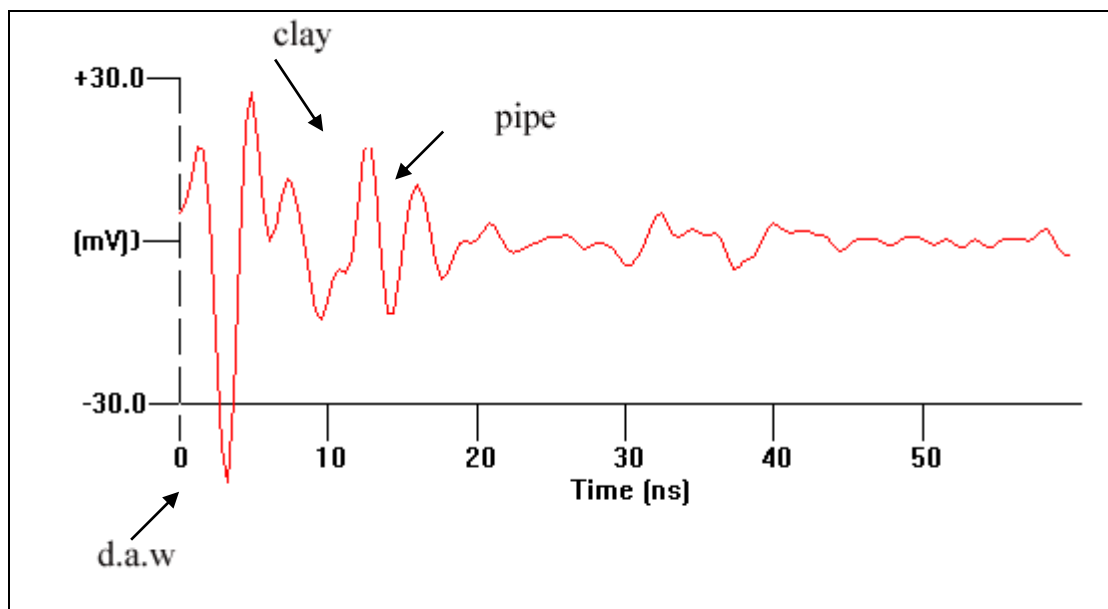
پروپیل ۲ است، اثر لوله فلزی با توان بازتاب بسیار بالا و واقع در عمق ۱ متری به زحمت دیده می‌شود. این اثر ضعیف در شکل‌های ۲-۵ و ۵-۵، احتمالاً به دلیل افزایش میزان رسوبات دانه‌ریز در بالای لوله، اصلاً مشاهده نمی‌شود. حداکثر فاصله دو بازتاب ناشی از رسوبات رسی و لوله فلزی در شکل ۵-۳، برابر ۶ نانوثانیه است. با توجه به سرعت امواج در رس‌ها و لای‌ها که در حدود ۰/۰۶ تا ۰/۰۷ متر بر نانوثانیه است [۱۲، ۳۳]، با استفاده از رابطه (۴-۱) حداکثر ضخامت این رسوبات در بالای لوله فلزی در محل پروپیل ۱، ۱۸ تا ۲۱ سانتیمتر است. همان‌طور که در شکل‌های ۲-۵ و ۵-۵ دیده می‌شود، اثر لوله فلزی احتمالاً به دلیل افزایش ضخامت رسوبات رسی حذف شده است. این پدیده نشانگر استفاده از رسوبات ریزدانه رسی (و احتمالاً سیلتی) برای محافظت لوله است. در صورتی که اگر از رسوبات ماسه‌ای برای محافظت لوله استفاده شده بود، به دلیل کم اتلاف بودن این‌گونه محیط‌ها [۲۵]، اثر لوله فلزی به راحتی قابل تشخیص می‌بود.

فلزات به دلیل داشتن گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی فوق العاده بالا، دارای توان بازتاب بسیار بالایی هستند. به این ترتیب که تقریباً تمام انرژی موج فرودی به سطح آنها بازتاب می‌شود. به دلیل عمق پوسته پایین امواج GPR در فلزات، امواج GPR در فواصل بسیار کوتاهی در آنها اتلاف می‌شوند و توانایی عبور از چنین ساختارهایی را نخواهند داشت [۴۱]. از این‌رو در مقاطع GPR مگر در شرایطی خاص، هیچ‌گونه بازتابی پایین‌تر از سطح فلزات مشاهده نخواهد شد. به این ترتیب بی‌هنجاری تاکدیسی شکل در شکل‌های ۳-۵ و ۴-۵ نمی‌توانند اثر لوله فلزی در این عمق باشد.

در شکل ۵-۶ یک رد از پروپیل ۲ در محل ۴/۳۵ متری از پروپیل به صورت مجزا نمایش داده شده است. اثر رسوبات رسی و همچنین لوله فلزی بر روی آن مشخص شده است. اثر موجی که مستقیماً از طریق هوا به آنتن گیرنده رسیده است، با واژه $d.a.w^{112}$ مشخص شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، هر دو بازتاب دارای قطبیت منفی (معکوس قطبیت موج مستقیم هوایی) می‌باشند. این پدیده از بازتاب موج از دو فصل مشترک با تغییر امپدانس الکترومغناطیس از مقدار بزرگتر به مقدار کوچکتر، ناشی شده است. امواج GPR در عبور از فصل مشترک‌های خاک-رسوبات دانه‌ریز و همچنین رسوبات دانه‌ریز-لوله فلزی، از مواد با امپدانس الکترومغناطیس بالا به مواد با امپدانس الکترومغناطیس پایین، عبور کرده است (از مواد با سرعت موج الکترومغناطیس بالا به مواد با سرعت موج الکترومغناطیس پایین). اگر از رسوبات ماسه‌ای برای حفاظت

¹¹² Direct air wave

از لوله استفاده می‌شد، به دلیل رسانندگی و گذردهی دی‌الکتریک پایین این رسوبات در مقایسه با خاک منطقه، قطبیت موج بازتابی از آن، هم علامت موج مستقیم هوایی بود.



شکل ۵-۶: یک رد منفرد GPR در ایستگاه ۴/۳۵ متری از شکل ۵-۴.

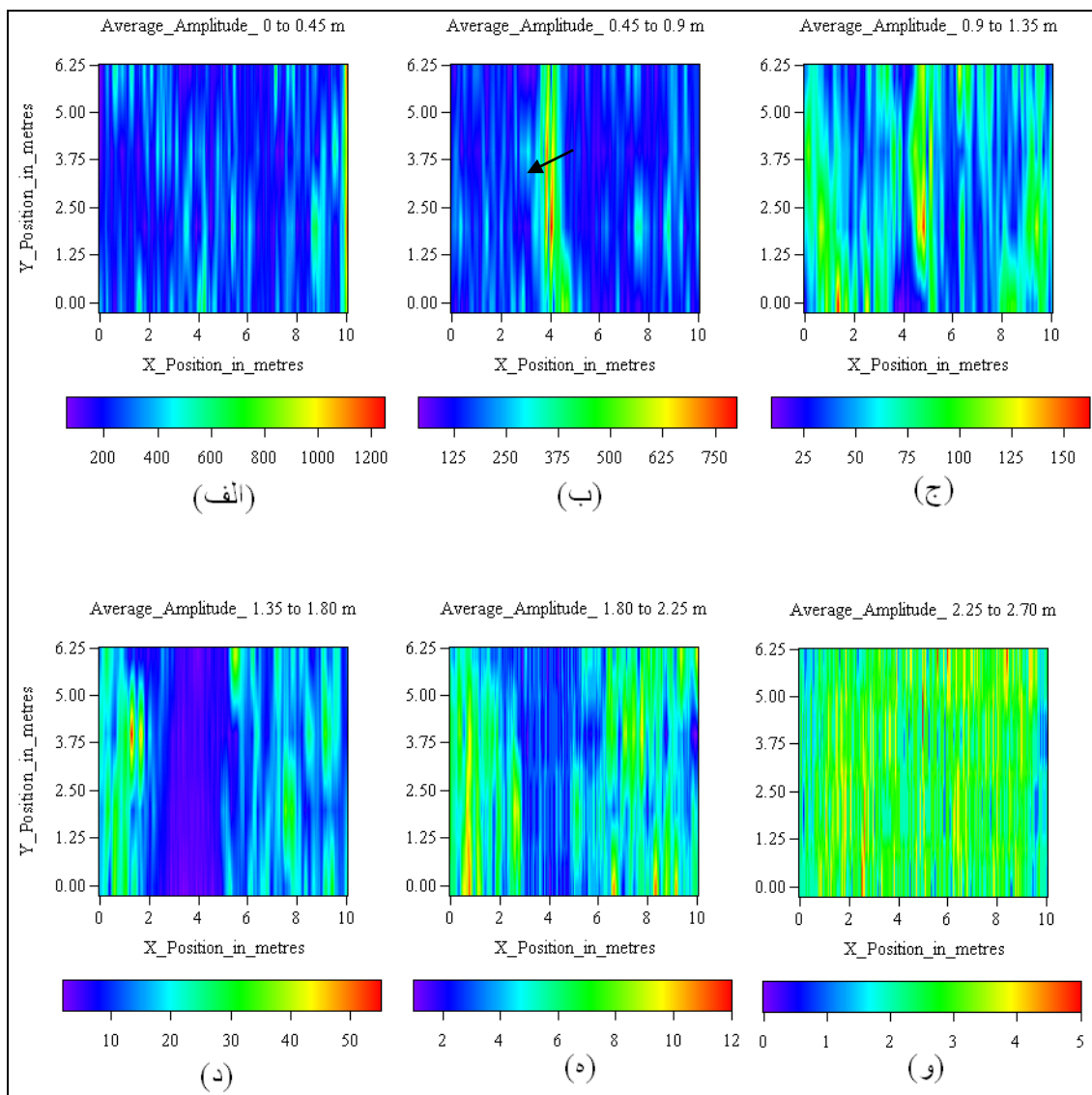
از آنجا که اندازه‌گیری‌های GPR در این بررسی بر روی شبکه‌ای منظم صورت گرفت، نمایش داده‌های GPR به صورت ۳ بعدی نیز امکان‌پذیر است. برای این منظور با استفاده از نرم افزار EKKO_Mapper [۲۸]، مقاطع عمقی از اعماق مختلف این منطقه تهیه شد. این مقاطع در شکل ۵-۷ به نمایش درآمده است. برای بدست آوردن این مقاطع از پردازش‌های Dewow، میانگین پوش^{۱۱۳}، مهاجرت به ازاء سرعت ۰/۱۲ متر بر ثانیه و همچنین تفریق زمینه^{۱۱۴} استفاده شده است.

مقاطعی که در شکل ۵-۷ به نمایش درآمده، به صورت میانگین‌گیری دامنه سیگنال به ازاء هر ۴۵ سانتیمتر به دست آمده است. به این ترتیب به ازاء هر ۴۵ سانتیمتر از سطح زمین یک مقطع تهیه شده است. این مقاطع از سطح زمین به طرف عمق از (الف) تا (و) نامگذاری شده و در شکل ۵-۷ به نمایش درآمده اند.

¹¹³ Average envelope

¹¹⁴ Background subtraction

همان‌طور که در مقطع (الف) از شکل ۵-۷ مشهود است، اثری از مسیر لوله در این اعماق مشاهده نمی‌شود. مقطع (ب) از این شکل، میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۰/۴۵ تا ۰/۹ متر است. اثر لوله فلزی و همچنین بازتاب‌های ناشی از رسوبات رسی اطراف لوله به صورت کاملاً مشخص در ۴ متری مقطع (ب) به خوبی دیده شده و با فلش مشخص شده است. منطقه اطراف ۴ متر در مقاطع (د) و (ه) دارای میانگین دامنه بسیار پایین بوده و با رنگ آبی در این شکل‌ها مشخص است. این مناطق با میانگین دامنه پایین در زیر بازتاب پیوسته ناشی از لوله و رسوبات اطراف آن دیده می‌شوند. این پدیده ناشی از توان بازتاب بالای رسوبات رسی و لوله فلزی و همچنین میزان اتلاف بالای این نواحی می‌باشد. مقطع (و) از شکل ۵-۷ میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۲/۲۵ تا ۲/۷۰ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، دامنه سیگنال بسیار کاهش یافته و پاسخی از ساختارهای زیرسطحی در این اعماق دیده نمی‌شود. این امر ناشی از عمق نفوذ محدود GPR در این منطقه است.



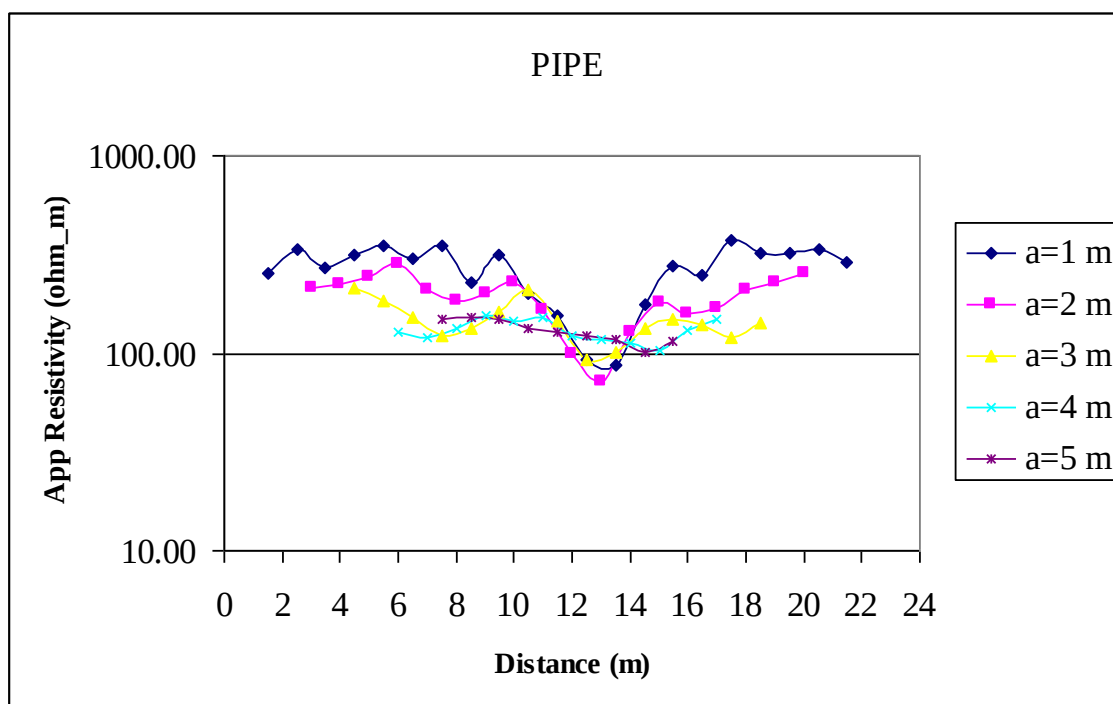
شکل ۵-۷: میانگین دامنه سیگنال برحسب عمق برای لوله انتقال فرآورده‌های نفتی، عمق ۰ تا ۰/۴۵ متر (الف)، ۰/۴۵ تا ۰/۹ متر (ب)، ۰/۹ تا ۱/۳۵ متر (ج)، ۱/۳۵ تا ۱/۸۰ متر (د)، ۱/۸۰ تا ۲/۲۵ متر (ه) و ۲/۲۵ تا ۲/۷۰ متر (و).

۵-۱-۲- اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه

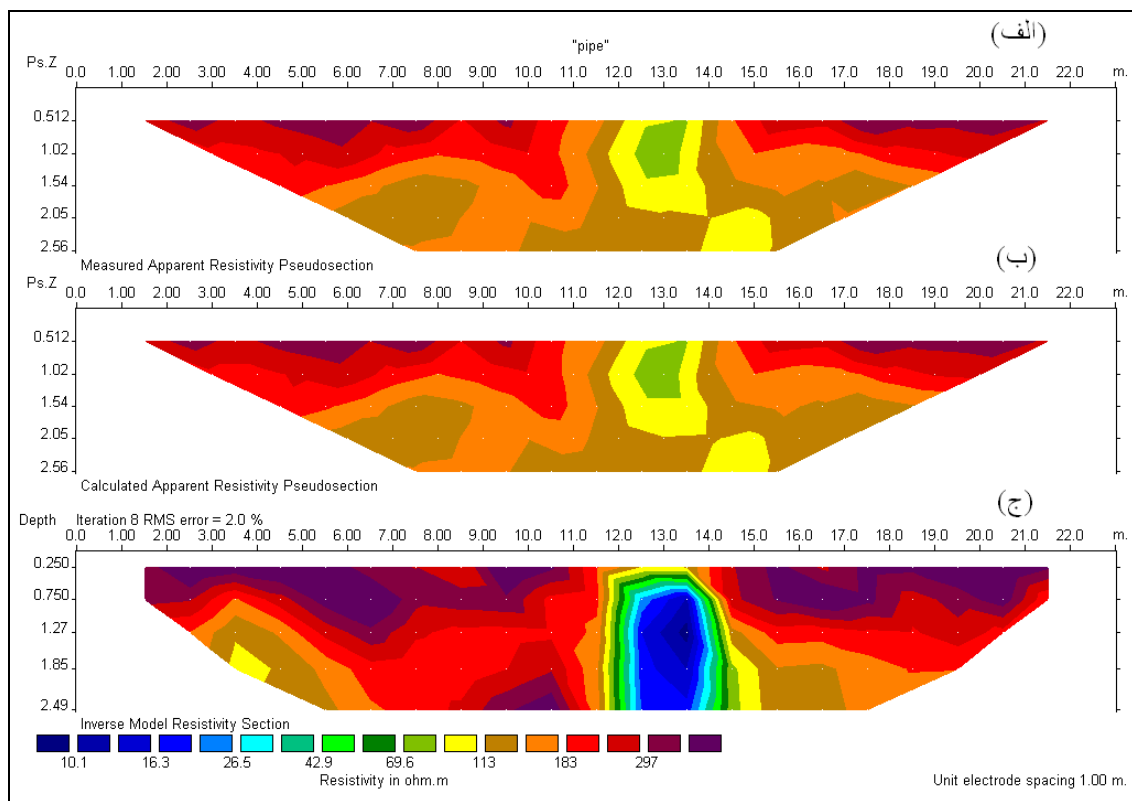
در محل پروفیل صفر GPR، اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه برای آشکارسازی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی نیز صورت گرفت. برداشت‌های مقاومت ویژه به روش پروفیل‌زنی با استفاده از آرایش ورنر و به ازاء فواصل میان الکترودی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ متر صورت گرفت. طول پروفیل مقاومت ویژه از پروفیل GPR متناظر، بزرگتر در نظر گرفته شد. در شکل ۵-۸ پروفیل‌های مقاومت ویژه ظاهری ورنر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف نشان داده شده است. لوله فلزی در فاصله ۱۳ تا ۱۴ متری از طول پروفیل واقع است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، پروفیل‌های با فواصل میان الکترودی ۱، ۲ و ۳ متری یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین در محل

دفع لوله فلزی از خود نشان می‌دهند. پروفیل‌های با فاصله میان الکترودی ۴ و ۵ متر برخلاف پروفیل‌های قبل، اثری از لوله فلزی نشان نمی‌دهند. این مطلب از عمق دفن پایین لوله نشأت گرفته است. همان‌طور که از اندازه‌گیری‌های GPR در بخش قبل مشاهده شد، عمق دفن لوله کمتر از ۱ متر می‌باشد.

در شکل ۵-۹ شبه مقاطع و مقطع دوبعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل سازی وارون مربوط به این پروفیل نشان داده شده است. در مقطع دوبعدی حاصل از مدل سازی وارون (شکل ۵-۹ ج)، یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین از ۱۲ تا ۱۴ متری پروفیل دیده می‌شود. این بی‌هنجاری می‌تواند از حضور رسوبات ریزدانه (رسی و احتمالاً سیلتی) در اطراف لوله ناشی شده باشد. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین به سمت نقطه‌ای در فاصله ۱۳ تا ۱۴ متری و در عمق ۱/۲۷ متری، همگرا می‌شود. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه پایین‌تر می‌تواند ناشی از لوله فلزی در این عمق باشد. این نتیجه با نتایج بدست آمده GPR در بخش قبل تطابق خوبی دارد. همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود، بی‌هنجاری تا عمق ۲/۵ متری امتداد یافته است. بعید به نظر می‌رسد که زمین تا این عمق برای مدفون کردن لوله‌ای در عمق کمتر از ۱ متر، حفر شده باشد. از این رو کاهش مقاومت ویژه در اعماق بیشتر در این محل، احتمالاً ناشی از حضور رسوبات رسی اطراف لوله در طبقات پایینی خاک در این ناحیه است.



شکل ۵-۸: پروفیل‌های مقاومت ویژه و نر به ازاء فواصل میان الکترودی مختلف بر روی لوله فلزی.

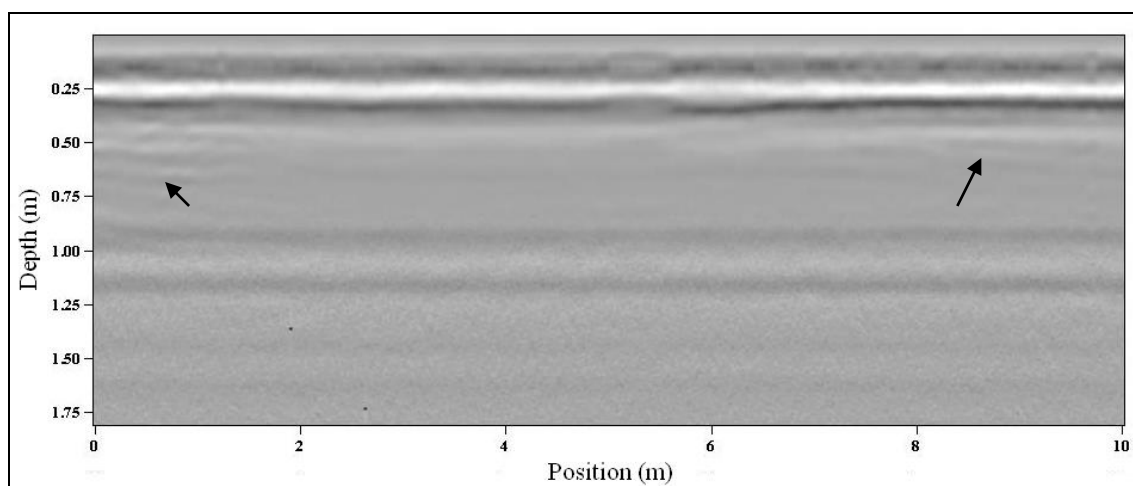


شکل ۵-۹: شبه مقاطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه لوله فلزی مدفون. شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه اندازه-گیری شده (الف)، شبه مقطع مقاومت ویژه محاسبه شده (ب) و مقطع نهایی حاصل از مدل سازی وارون (ج).

۵-۲- لوله مدفون در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا

برای نمایش تأثیر نامطلوب رسانندگی محیط‌های تحت بررسی در اندازه‌گیری‌های GPR، یک پروفیل GPR برای آشکارسازی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی در زمین‌های با رسانندگی الکتریکی بالا در نظر گرفته شد. لوله انتقال فرآورده‌های نفتی در بخشی از مسیر خود از زمین فوتبال دانشگاه می‌گذرد. لایه فوقانی خاک در زمین فوتبال دانشگاه تا عمق تقریبی ۷۰ سانتیمتری از خاک رس تشکیل شده است. آبیاری متناوب زمین و همچنین قابلیت بالای رس در نگهداری آب، رسانندگی بالای این منطقه را سبب شده است. این پروفیل مشابه با ۴ پروفیل بخش قبل که در کنار زمین فوتبال دانشگاه برداشت شد، به طول ۱۰ متر عمود بر روی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی در نظر گرفته شد. فاصله این پروفیل از شبکه برداشت مزبور در بخش قبل در حدود ۱۰ متر می‌باشد و در شکل ۵-۱ با حرف لاتین Pg مشخص شده است.

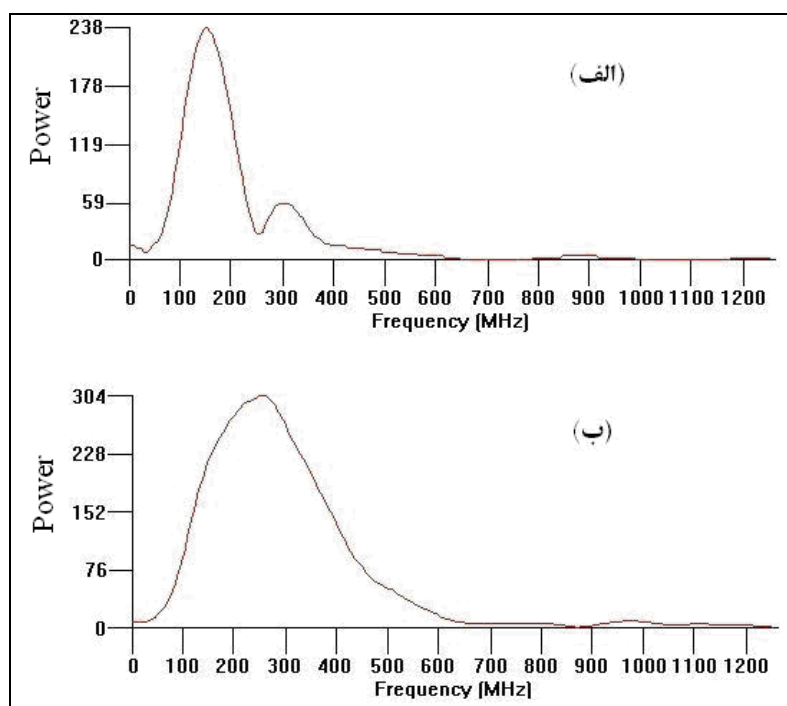
در شکل ۵-۱۰ مقطع عمقی پروفیل GPR نمایش داده شده است. این مقطع با استفاده از سرعت 0.6 متر بر نانو ثانیه (سرعت امواج GPR در رس‌ها) و با استفاده از پردازش‌های Dewow و بهره SEC به دست آمده است. به دلیل اتلاف فوق‌العاده بالای رس‌های مرطوب، هیچ اثری از لوله فلزی در شکل ۵-۱۰ دیده نمی‌شود. دو خط موازی که در اعماق 0.9 و 1.2 متر در تمام طول پروفیل دیده می‌شوند، بی‌هنجاری ناشی از ساختارهای زیرسطحی نمی‌باشند. این رویداد به مقدار ضعیف‌تری در تمام مقاطع GPR که در این فصل و فصل چهارم آورده شد، تا حدودی قابل تشخیص است. این پدیده احتمالاً به مشخصه‌های دستگاه مورد استفاده مربوط بوده و ممکن است به دلیل استفاده از کابل‌های فلزی برای اتصال آنتن‌ها به کنسول به‌وجود آمده باشد [۲۵].



شکل ۵-۱۰: مقطع عمقی داده‌های GPR در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا

در شکل ۵-۱۱ الف میانگین طیف فرکانس بازگشتی در آنتن گیرنده برای این پروفیل به نمایش درآمده است. برای مقایسه با محیط‌های با رسانندگی الکتریکی پایین‌تر، میانگین طیف فرکانس بازگشتی برای پروفیل صفر از بخش قبل، در شکل ۵-۱۱ ب به نمایش درآمده است. در مقایسه این دو طیف فرکانس دو نکته کاملاً مشهود است. فرکانس مرکزی در برداشت در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا (شکل الف)) به مقادیر پایین‌تری (در حدود 170 مگاهرتز) منتقل شده است. در صورتی که طیف فرکانس بازگشتی برای پروفیل صفر در حدود 250 مگاهرتز می‌باشد. این پدیده از اتلاف بیشتر فرکانس‌های بالا نشأت گرفته است. به این ترتیب که اجزاء با فرکانس‌های بالاتر پالس GPR در محیط‌های با رسانندگی الکتریکی بالا، سریعتر اتلاف

می‌شوند. پدیده دیگری که در میانگین طیف فرکانس (الف) دیده می‌شود، یک پیک جزئی در فرکانس ۳۰۰ مگاهرتز می‌باشد. این اثر احتمالاً از پدیده رینگینگ^{۱۱۵} ناشی شده است. زمانی که پالس GPR بین آنتن‌ها و یک منطقه با رسانندگی الکتریکی بالا به تناوب بازتاب می‌گردد، این نوفه پدیدار می‌شود [۲۵، ۲۱]. بی‌هنجاری مشاهده شده در ابتدا و انتهای پروفیل در شکل ۵-۱۰ که به صورت یک‌سری پالس‌های متوالی به زحمت قابل تشخیص بوده و با فلش در این مکان‌ها مشخص شده است، احتمالاً ناشی از پدیده رینگینگ می‌باشد. از آنجا که این نوفه دارای فرکانسی متفاوت با فرکانس سیگنال‌ها است، با انتخاب فیلتری مناسب در حوزه فرکانس قابل حذف و کاهش است.

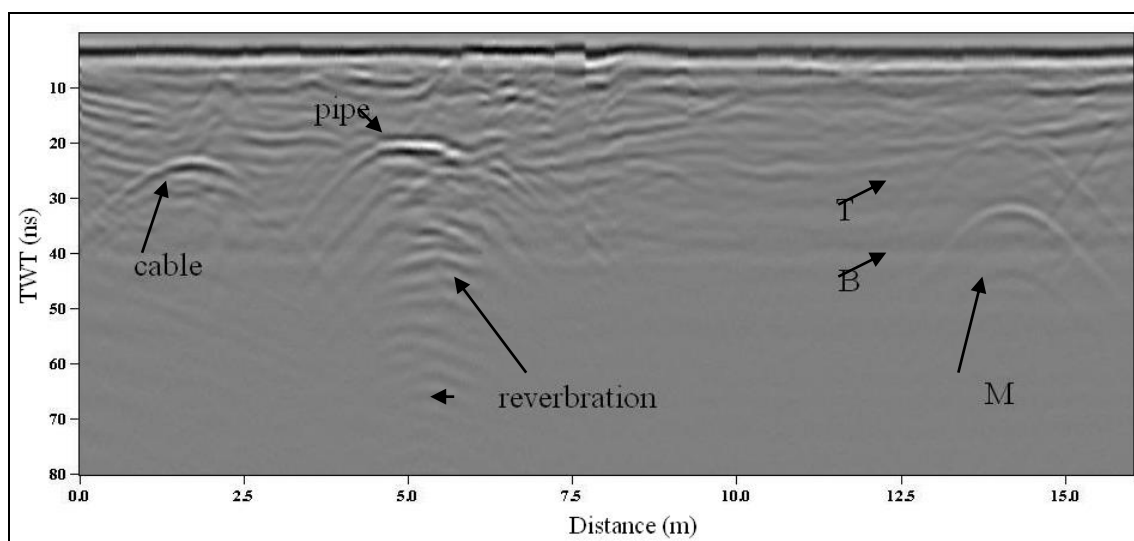


شکل ۵-۱۱: میانگین طیف فرکانس بازگشتی برای برداشت در خاک‌های با رسانندگی بالا (الف) و پروفیل صفر از بخش ۵-۱ (ب).

¹¹⁵ Ringing

بر روی لوله‌های GPR ۵-۳- اندازه‌گیری‌های تأسیساتی

قابلیت روش GPR در تعیین مکان لوله‌های تأسیساتی، بر روی پروفیلی به طول ۱۶ متر، مورد بررسی قرار گرفت. این بررسی در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود، در فاصله بین ساختمان تأسیسات دانشگاه و خوابگاه دانشجویی، صورت پذیرفت. در شکل ۵-۱۲ مقطع زمانی این پروفیل به نمایش درآمده است. این مقطع با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC به ازاء ضریب اتلاف ۳ و مقدار حداکثر بهره ۱۰۰ تهیه شده است. همچنین برای حذف نوفه‌های فرکانس بالای ناشی از اثر بهره مورد استفاده، از فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع ۶۲۸ مگاهرتز، استفاده شده است.



شکل ۵-۱۲: مقطع زمانی پروفیل GPR با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین‌گذر.

در شکل ۵-۱۲ چند هذلولی پراش در نقاط مختلف به چشم می‌خورند. اولین هذلولی در فاصله تقریبی ۱/۵ متری پروفیل واقع شده و نشان دهنده اثر کابل‌های برق مدفون در این ناحیه است. از واژه cable برای نشان داده این اثر استفاده شده است. در ۵ متری پروفیل، کانال تأسیساتی واقع شده و دارای ابعاد تقریبی ۱ متر عرض و کمتر از ۲ متر ارتفاع می‌باشد. سقف این کانال در عمق تقریبی ۰/۸ متر از سطح زمین واقع است. این کانال برای عبور لوله‌های تأسیساتی تعبیه شده و دو لوله فلزی به قطرهای ۶ و ۸ اینچ، از سمت چپ کانال

عبور می‌کنند. از آنجا که این لوله‌ها با فاصله کمی روی یکدیگر واقع شده و درون کانال هوا قرار دارند، به دلیل سرعت بالای امواج و به واسطه آن قدرت تفکیک پایین GPR درون هوا، پاسخ‌های ناشی از این دو لوله به صورت یک هذلولی دیده می‌شود. این هذلولی در فاصله ۵ متری پروفیل که از حرف pipe برای نشان آن استفاده شده است، پاسخ ناشی از لوله‌های فلزی درون این کانال می‌باشد. عمق لوله‌ها در این منطقه در حدود ۱/۳ متر می‌باشد. ابعاد کانال در مقایسه با طول موج فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده در هوا (در حدود ۱/۲ متر)، قابل توجه است. از این رو مشاهده پدیده بازآوایش ناشی از وجود هوای درون کانال، مورد انتظار است [۲۱]. این پدیده در ۵/۵ متری پروفیل به خوبی مشهود است و از واژه reverberation برای نمایش آن استفاده شده است. سه هذلولی متوالی در ۱۴ متری پروفیل با فواصل زمانی ۱۲ تا ۱۳ نانوثانیه دیده می‌شوند. در نگاه اول ممکن است این هذلولی‌ها را ناشی از چند فصل مشترک مختلف تفسیر کنیم. در صورتی که مسبب این هذلولی‌ها، وجود لوله آب آشامیدنی به قطر ۸ اینچ در این منطقه می‌باشد. این لوله همانند لوله واقع در کانال حاوی آب بوده و از قطر یکسانی برخوردار است، تنها دلیل وجود پاسخ متفاوت، جنس متفاوت لوله‌ها است. لوله واقع در موقعیت ۱۴ متری، از جنس آریست بوده و در عمق ۱ متری مدفون است. اختلاف بالا در گذردهی خاک و آب شیرین و همچنین اتلاف پایین امواج توسط آب آشامیدنی، چنین بازتاب‌هایی را سبب شده است. هذلولی اول که از حرف T برای نمایش آن استفاده شده، پاسخ ناشی از قسمت فوقانی لوله است. هذلولی دوم، بازتاب ناشی از قسمت تحتانی لوله بوده و از حرف B برای نمایش آن استفاده شده است. هذلولی سوم که اولین بازتاب درونی (چندگانه^{۱۶}) لوله است خیلی ضعیف‌تر بوده و با حرف M نمایش داده شده است. علت وجود چنین فاصله‌ای مابین این پاسخ‌ها، سرعت فوق العاده پایین امواج GPR درون آب است. عوض شدن قطبیت این هذلولی‌ها که ناشی از تغییر سرعت در جهت عکس در این فصل مشترک هاست، قابل توجه است. فواصل زمانی این هذلولی‌ها چیزی در حدود ۱۲ الی ۱۳ نانوثانیه است. با توجه به سرعت امواج GPR در آب که برابر ۰/۰۳۳ متر بر نانوثانیه است و با استفاده از رابطه (۴-۱) قطر این لوله را در حدود ۲۰ الی ۲۱/۵ سانتیمتر تخمین می‌زنیم. این نتیجه تطابق خوبی با نتیجه واقعی (قطر ۸ اینچی لوله) دارد. وجود این بی‌هنجاری‌ها که اطلاعات قابل توجهی از روی آن به دست آوردیم، تأکیدی بر توانمندی روش GPR همچنین در به نقشه درآوردن ساختارهای غیر فلزی است.

فلزات دارای گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی بسیار بالاتری نسبت به مواد تشکیل دهنده پوسته زمین هستند [۴۱]. همان‌طور که در مقطع زمانی شکل ۵-۱۲ دیده می‌شود، لوله‌ها و کابل‌های فلزی بازتاب‌های بارزتری را نسبت به لوله آزیستی نشان می‌دهند. عمق پوسته امواج GPR در فلزات بسیار پایین است. از این‌رو این امواج به سرعت در آنها اتلاف می‌شوند. به همین دلیل هیچ بازتابی از قسمت تحتانی لوله‌های فلزی در مقاطع GPR دیده نمی‌شود.

فصل ششم

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از انجام این پایان نامه را می توان به صورت فهرست وار بیان کرد:

- هرچند در این مطالعه تنها از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پوششی در اندازه گیری های GPR و آرایش و نر و دوقطبی-دوقطبی در اندازه گیری های مقاومت ویژه استفاده شده است، ولی با تعمیم این نتایج می توان به راحتی چنین استنباط کرد که روش GPR در مقایسه با روش مقاومت ویژه از قدرت تفکیک بالاتری برخوردار است. این مسئله در مقایسه پاسخ های ناشی از کانال آب در پروفیل صفر از فصل چهارم به خوبی مشهود است. همچنین از مقایسه پروفیل های مقاومت ویژه با دو آرایش مذکور می توان نتیجه

گرفت که اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه با آرایش دوقطبی-دوقطبی از تفکیک جانبی بالاتری در مقایسه با آرایش وئر برخوردار است.

- قدرت تفکیک روش GPR تابعی از طول موج مورد استفاده و به واسطه آن سرعت امواج GPR در محیط تحت بررسی است. چنانچه در آشکارسازی لوله آب در بخش ۵-۳، در شکل ۵-۱۲ مشاهده شد، به دلیل سرعت پایین امواج GPR در آب، پاسخ‌های ناشی از قسمت‌های فوقانی و تحتانی لوله به خوبی قابل تفکیک است. این لوله دارای قطر ۸ اینچی است، در صورتی که ابعاد لوله از این مقدار هم کوچکتر باشد، تفکیک پاسخ‌ها از یکدیگر باز هم امکان‌پذیر خواهد بود.
- روش GPR در آشکارسازی مرزهای ناگهانی بسیار موفق عمل می‌کند. از آنجا که سازه‌های انسانی مدفون در خاک معمولاً دارای چنین مرزی با محیط در برگیرنده خود هستند، روش GPR در آشکارسازی این اهداف بسیار موفق عمل می‌کند.
- از جمله مسائل پراهمیت در بکارگیری روش GPR که بایستی مد نظر قرار گیرد، رسانندگی محیط‌های تحت بررسی است. این گونه محیط‌ها با اتلاف امواج GPR، عمق نفوذ این امواج را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. چنانچه در اندازه‌گیری‌های بر روی قنات آب در فصل چهارم مشاهده شد، مجرای قنات واقع در اعماق بیش از دو متر توسط روش GPR قابل آشکارسازی نبوده است.
- در برداشت‌های GPR با توجه به مشخصات هدف مورد مطالعه، قدرت تفکیک و عمق نفوذ مطلوب، معمولاً یک فرکانس بهینه برای اندازه‌گیری‌ها در نظر گرفته می‌شود. اما استفاده از آنتن‌های با فرکانس مختلف در برخورد با شرایطی نظیر کانال آب در پروفیل صفر از فصل چهارم، اطلاعات بیشتری در اختیار مفسر قرار می‌گیرد. به این واسطه ارائه تفسیر منطقی و مطمئن‌تر از مقاطع GPR امکان‌پذیر است.
- دامنه پردازش‌ها و روند اعمال پردازش داده‌های GPR با توجه به هدف مورد مطالعه، محیط برداشت داده‌ها و پارامترهای دیگر کنترل می‌شود و با اعمال الگوریتم‌های مختلف پردازش می‌توان به مقاطع مختلفی دست یافت. چنانچه از شکل ۴-۱۸ دیده شد، با اعمال پردازش‌های متفاوت بر روی یک‌سری از داده‌های برداشتی، به دو مقطع قابل تفسیر دست یافتیم. هر یک از این مقاطع اطلاعات مفیدی در اختیارمان قرار دادند.

- در آشکارسازی لوله‌های مدفون، تفاوت در جنس لوله‌ها و همچنین مایع محتوی آن‌ها، پاسخ‌های متفاوتی در مقاطع GPR سبب می‌شوند. با استفاده از این اطلاعات، در پاره‌ای از موارد نظیر اندازه‌گیری‌های GPR بر روی لوله‌های تأسیساتی در بخش ۳-۵، تخمین ابعاد لوله‌ها نیز امکان‌پذیر است.
- در آشکارسازی لوله‌های تأسیساتی در بخش ۳-۵، سطح زمین در این منطقه دارای پوشش آسفالتی است و به دلیل محدودیت‌های مکانی، امکان اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه با مشکلاتی همراه است. حتی اگر در این منطقه این محدودیت‌ها برای برداشت داده‌های مقاومت ویژه نیز وجود نداشت، لوله فلزی واقع درون کانال هوا به دلیل عدم تماس با دیواره‌های کانال قابل آشکارسازی نمی‌بود. این مطلب از مقاومت ویژه بالای هوای درون کانال ناشی می‌شود. وجود حفاظ‌های فلزی و اشیاء فلزی دیگر در سطح و یا در زیر سطح زمین، استفاده از روش‌های مغناطیس و الکترومغناطیس در آشکارسازی لوله‌های فلزی و آّبستی را محدود می‌کند. با توجه به کوچک بودن ابعاد لوله‌ها در مقایسه با عمق دفن آن‌ها، روش‌های لرزه‌ای نیز از قدرت تفکیک لازم برای آشکارسازی تمام این بی‌هنجاری‌ها، برخوردار نبوده و همانند روش GPR قادر به استخراج این حجم از اطلاعات از این‌گونه اهداف نمی‌باشند.
- روش مقاومت ویژه در آشکارسازی مجرای قنات‌های خشک موفق‌تر از انواع محتوی آب آن عمل کرده است. هر چند این مسئله را می‌توان به نزدیک بودن مقاومت ویژه خاک‌های تحت بررسی به آب درون مجرای قنات نسبت داد ولی یکی از دلایل آن را می‌توان به قدرت تفکیک پایین روش مقاومت ویژه در عدم تفکیک مقاومت ویژه بالای هوا و بتن درون مجرای قنات، از خاک‌های مرطوب اطراف آن نسبت داد.
- از اهداف اولیه این پایان نامه مقایسه دو روش GPR و مقاومت ویژه می‌باشد. ولی نتایج حاصل از تحقیق نشان دهنده این مطلب است که روش مقاومت ویژه روشی ساده و مناسب برای کمک به تفسیر داده‌های GPR و بالعکس می‌باشد. هر چند روش GPR از قدرت تفکیک بالاتری نسبت به روش مقاومت ویژه برخوردار است ولی نتایج حاصل از تفسیر برداشت‌های هر دو روش مکمل یکدیگرند.
- از جمله مسائل پراهمیت که در انجام عملیات صحرایی در هر روش ژئوفیزیک می‌توان به آن اشاره کرد، زمان برداشت داده‌ها و تعداد نیروهای انسانی مورد نیاز است. تمامی پروفیل‌های GPR که در این پایان‌نامه آورده شده‌اند، در زمان مفید کمتر از ۱ ساعت اکتساب شدند. به علاوه اکتساب داده‌های GPR توسط دستگاه مورد استفاده، توسط یک نفر امکان‌پذیر است. این در صورتی است که برای

برداشت داده‌های مقاومت ویژه زمانی بالغ بر ۶ روز کاری توسط حداقل ۵ نیروی انسانی، صرف شده است. در پروژه‌هایی که زمان و هزینه‌های عملیات صحرایی از پارامترهای تعیین کننده در برداشت داده‌ها است، روش GPR برتری قابل توجهی نسبت به روش مقاومت ویژه دارد.

۶-۲- پیشنهادات

- از آنجا که قابلیت‌های روش GPR با توجه به زمین‌شناسی کشورمان تا حدودی ناشناخته است، پیشنهاد می‌شود که مقایسه و کاربرد آن در کنار دیگر روش‌های معمول ژئوفیزیک نیز صورت پذیرد. از جمله این موارد می‌توان به آشکارسازی لوله‌های فلزی و غیر فلزی توسط روش‌های مغناطیس و الکترومغناطیس در مقایسه با روش GPR اشاره کرد.
- با توجه به قدرت تفکیک، سهولت در برداشت داده‌ها و عدم تأثیرات نامطلوب بر روی محیط تحت بررسی توسط روش GPR، در برداشت‌های نزدیک سطح به روش مقاومت ویژه ترجیح داده می‌شود.
- با توجه به عمق نفوذ محدود روش GPR در محیط‌های با رسانندگی الکتریکی بالا، نظیر برخی از انواع رس‌ها و لای‌ها، استفاده از آن در این‌گونه محیط‌ها مگر در شرایطی که هدف در عمق کمی واقع است، توصیه نمی‌شود.
- برای تفکیک بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در شکل ۴-۴ بر روی کانال آب، اندازه‌گیری با فرکانس‌های مختلف GPR می‌تواند اطلاعاتی به منظور تفکیک آنها در اختیار قرار دهد. همچنین اندازه‌گیری‌های GPR بر روی مدل‌های کنترل شده آزمایشگاهی مشابه با کانال آب در این پروفیل، نتایج احتمالی ارزشمندی را در پی خواهد داشت. با کنترل و تغییر پارامترهایی نظیر عمق آب و مقدار هوای بالای سطح آب درون کانال هوا، می‌توان به مشاهدات ارزشمندی دست یافت. در چنین شرایطی استفاده از انواع نرم افزارهای پیشرفته لرزه‌ای نظیر Vista برای تفکیک بی‌هنجاری‌ها می‌تواند مفید واقع شود. علاوه بر این از روش‌های مختلف پردازش لرزه‌ای بر روی داده‌های GPR می‌توان استفاده و به نتایج احتمالی مفیدتر دست پیدا کرد.
- داده‌های GPR این مطالعه در آبان ماه و بعد از بارندگی فصل پاییز اکتساب شده‌اند. مرطوب بودن لایه‌های فوقانی زمین را می‌توان از دلایل عمق نفوذ پایین داده‌های GPR دانست. از این‌رو به منظور

افزایش عمق نفوذ، پیشنهاد می‌شود داده‌های GPR در فصول خشک سال برداشت شوند. برای این منظور می‌توان شهریور ماه را به عنوان زمانی مناسب برای اکتساب داده‌ها در نظر گرفت.

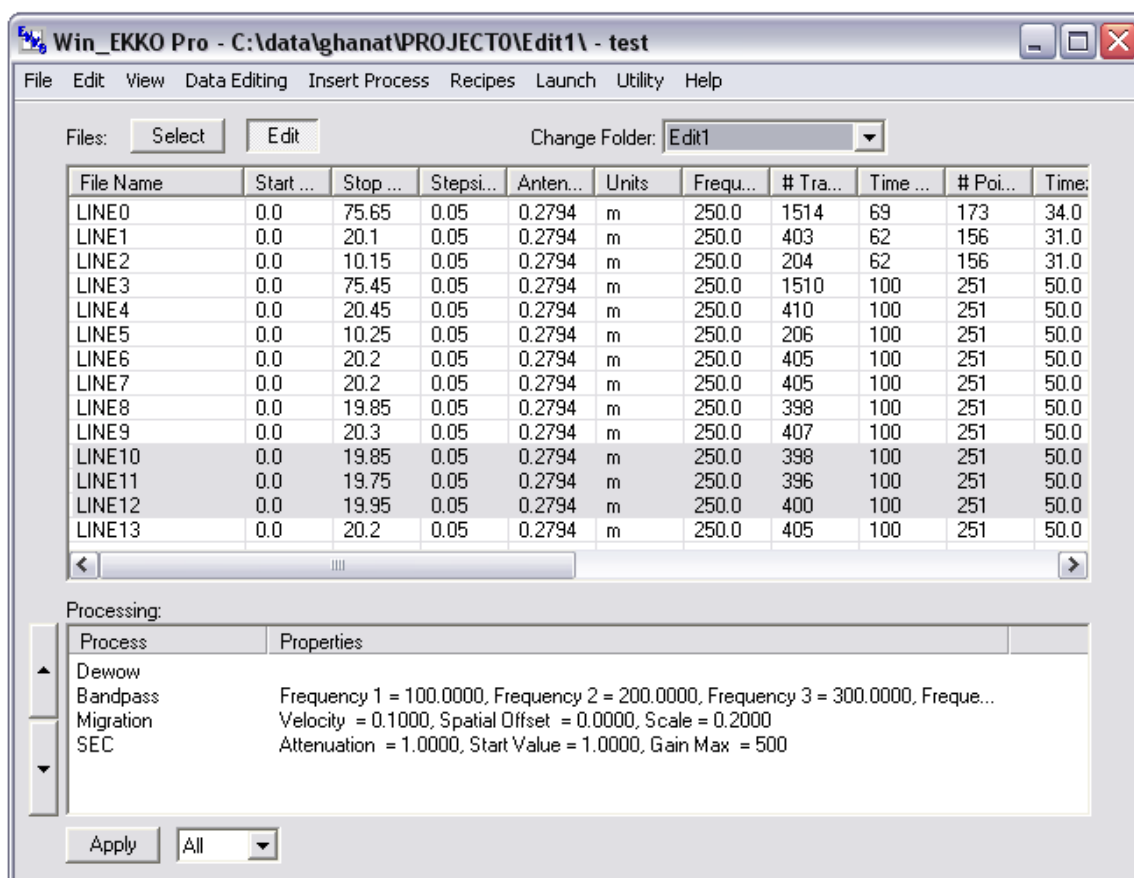
- به منظور آشکارسازی قنات آب و تشخیص چگونگی توزیع مقاومت ویژه در اطراف آن، پیشنهاد می‌شود از آرایش‌های دیگر مقاومت ویژه که از قدرت تفکیک بالاتری در مقایسه با آرایش وئر برخوردارند، بهره برد. برای این منظور آرایش وئر برای بررسی مقاومت ویژه پروفیل‌های اولیه که مجرای قنات در اعماق کمتری واقع است، مناسب می‌باشد. ولی برای بررسی قنات در اعماق بیشتر، با توجه به اینکه آرایش وئر شدیداً تحت تأثیر تغییرات نزدیک به سطح است، لذا پاسخ‌های مقاومت ویژه از اعماق بیشتر دقیق نخواهد بود. برای این منظور استفاده از آرایش‌های دیگر نظیر آرایش دوقطبی-دوقطبی با فواصل میان الکترودی مختلف و همچنین قطبی-دوقطبی متقارن می‌تواند مفید واقع شود.

پیوست الف: معرفی نرم افزار Win_EKKO Pro, V^{۱۱۷}:1.0

Win_EKKO Pro یک بسته نرم افزاری برای ویرایش، پردازش و نمایش داده‌های GPR تولید شده توسط دستگاه-های شرکت Sensors & Software می‌باشد. این نرم افزار تحت سیستم عامل Windows نوشته شده و برای کاربرانی که نیاز به ویرایش، پردازش و ترسیم حجم وسیعی از داده‌های GPR با سرعت و با کیفیت بالا دارند، طراحی شده است. همچنین این نرم افزار قادر است داده‌های تولید شده توسط دستگاه‌های GPR این شرکت را به فرمت‌های دیگر از قبیل SEG-Y، تبدیل کند. داده‌های GPR با تبدیل به این فرمت قابل پردازش توسط نرم افزارهای پیشرفته لرزه‌ای خواهند بود.

در شکل الف-۱ صفحه اصلی این نرم افزار به نمایش درآمده است. همانطور که از این شکل دیده می‌شود، این نرم افزار از یک جدول قابل فهم و ساده برای نمایش مشخصات داده‌های GPR و همچنین پارامترهای برداشت، استفاده می‌کند. در هر سطر یک فایل GPR به صورت مجزا قرار گرفته است. هر یک از این فایل‌ها معمولاً یک پروفیل برداشتی GPR می‌باشند. حداکثر تعداد ستون‌های این جدول ۲۲ ستون می‌باشد. قابلیت نمایش و عدم نمایش هر یک از این ستون‌ها با استفاده از سربرگ Edit که در صفحه اصلی نرم افزار دیده می‌شود، در اختیار

کاربر می‌باشد. در این ستون‌ها به ترتیب از چپ به راست، اطلاعاتی نظیر نام فایل، موقعیت مکانی ابتدا و انتهای پروفیل‌ها، فواصل ایستگاهی، فاصله آنتن‌ها، واحد اندازه‌گیری فواصل، فرکانس مرکزی دستگاه، تعداد ردهای برداشتی، پنجره زمانی و غیره به نمایش درآمده است. نمایش اطلاعات مربوط به داده‌های برداشتی و هر یک از پارامترهای برداشت به این شیوه، تشخیص سریع خطاهای موجود در داده‌های برداشتی را ممکن می‌سازد. کاربر می‌تواند به راحتی با راست کلیک بر روی ستون‌های مربوطه و مشاهده امکان‌های موجود ویرایش برای هریک از پارامترهای برداشت، در حین مشاهده این پارامترها آنها را برای مراحل پردازش بعدی، تصحیح نماید. ویرایش و پردازش هر یک از فایل‌ها و یا تمام پروژه توسط این نرم افزار امکان‌پذیر است. همچنین یک روند پردازش مطلوب که تناسب آن برای پروژه‌ای 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 پردازش را بازخوانی کرده و بر روی داده‌های دیگر اعمال کند.



در این نرم افزار برخلاف برخی دیگر از نرم افزارهای موجود این شرکت، اعمال روند پردازش و پارامترهای هر عملگر پردازش، به صورت تام در اختیار کاربر می باشد. به این ترتیب که در هر مرحله از پردازش با مشاهده مقاطع، ردهای 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 نرم افزار داده های اولیه در یک پوشه اولیه ذخیره شده و داده های ویرایش و پردازش یافته در زیرپوشه^{۱۱۸} ای از داده های اولیه قرار می گیرند. از این رو داده های اولیه بدون هیچ تغییری دست نخورده باقی مانده و مجدداً در هر زمانی می توان برای فعالیت های بعدی از آنها استفاده کرد. در هر مرحله از پردازش و اعمال یک روند ویرایش و پردازش خاص، می توان داده ها را در یک زیرپوشه جدید ذخیره کرد. به این ترتیب در هر مرحله امکان مقایسه مقاطع بدست آمده از پردازش های مختلف نیز وجود خواهد داشت.

هر خط برداشت و یا هر فایل از داده های GPR که توسط دستگاه های Sensors & Software اکتساب می شوند، از دو فایل مجزا تشکیل یافته است. یک فایل عنوان^{۱۱۹} ACSII با پسوند HD و یک فایل داده های دودویی^{۱۲۰} با پسوند DT1. برای استفاده از این نرم افزار هر دو فایل بایستی در پوشه پروژه مورد نظر در اختیار باشند. فایل پروژه های Win_EKKO Pro با پسوند Prj در پوشه داده های اولیه ذخیره می شود.

در شکل الف-۱ بالای جدول مذکور دو منوی Edit و Select موجود است. در منوی Select مشخصات و نقشه های مربوط داده های GPR قابل نمایش است ولی داده ها در این منو قابل ویرایش و پردازش نمی باشند. اما در منوی Edit، یک کپی از داده های اصلی برای ویرایش و پردازش در اختیار کاربر قرار می گیرد. مراحل پردازش و ویرایش که در زیرپوشه پروژه مورد نظر ذخیره می شوند، از پوشه آبشاری Change folder در سمت راست دو منوی مذکور قابل دسترسی می باشند.

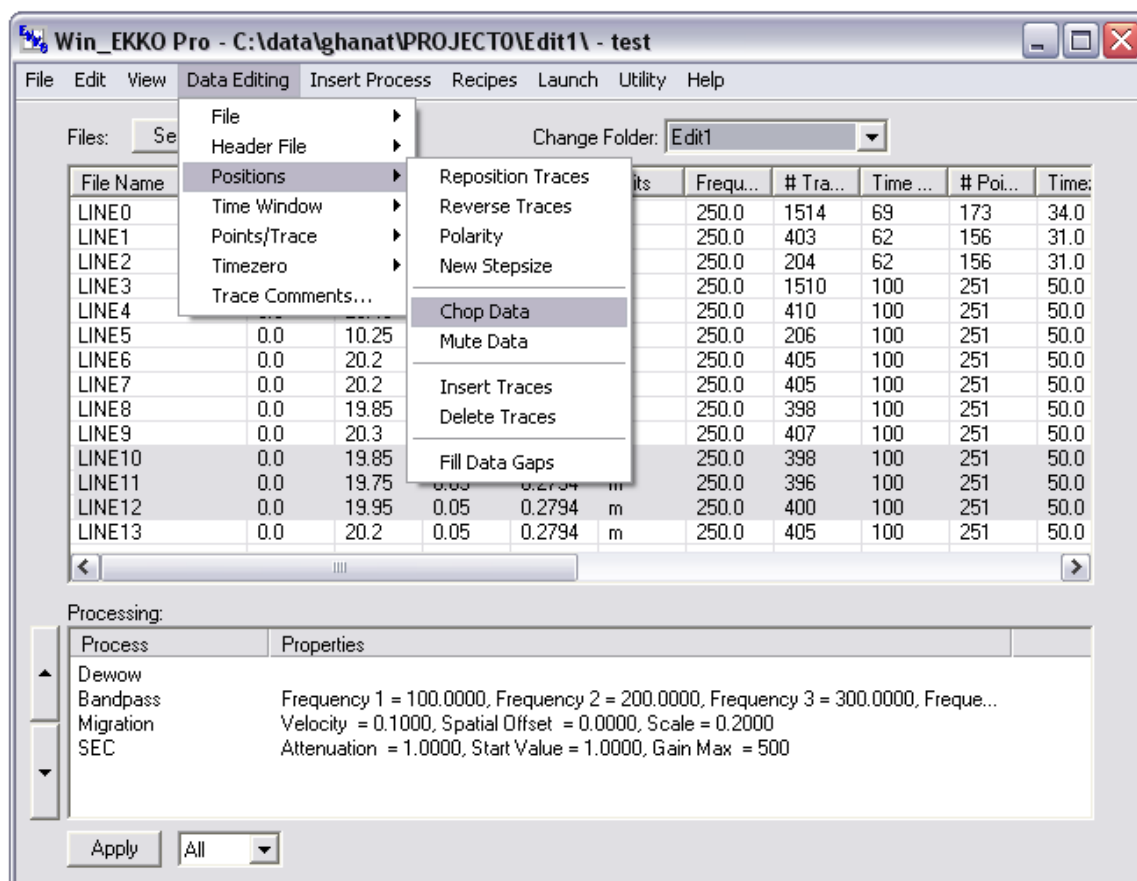
¹¹⁸ Subfolder

¹¹⁹ Header

¹²⁰ Binary

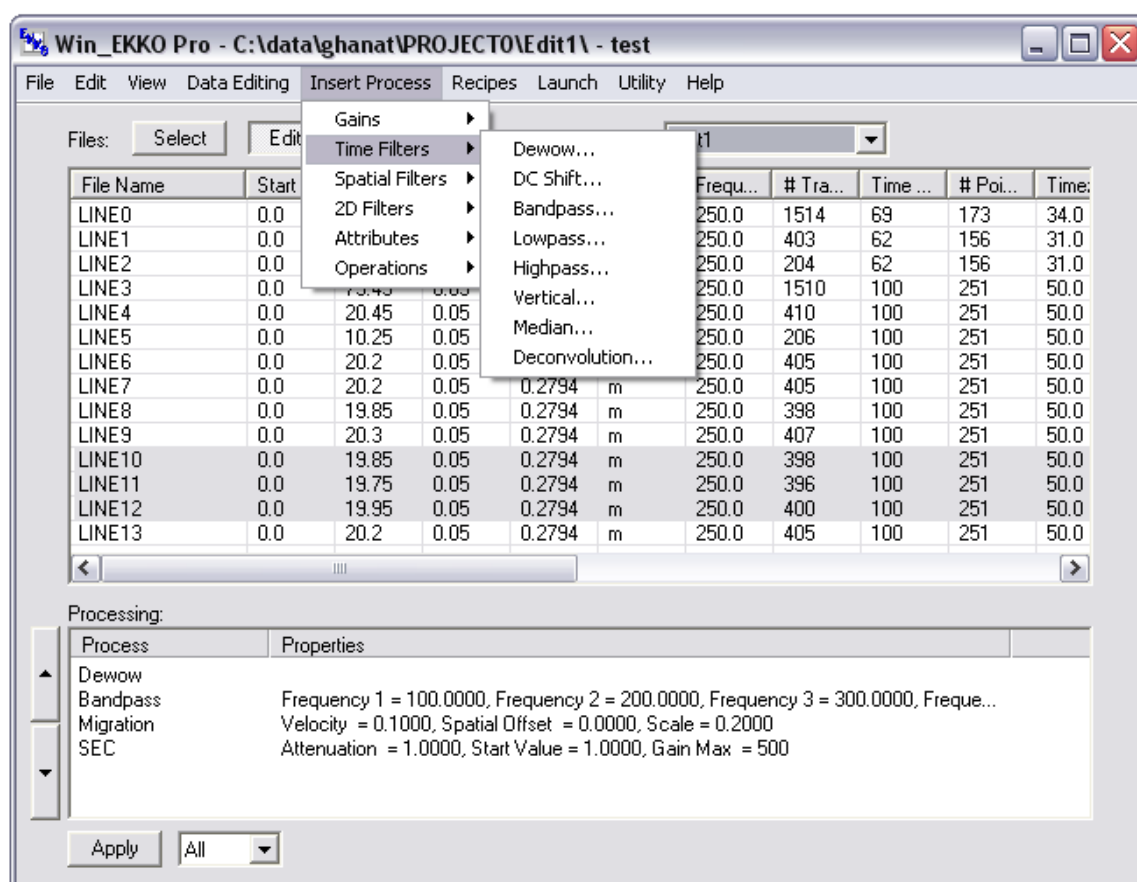
همچنین بعد از ویرایش و پردازش داده‌های GPR در این نرم افزار، قابلیت راه اندازی و نمایش داده‌ها توسط نرم افزارهای دیگر شرکت Sensors & Software نظیر EKKO_Mapper، EKKO_Pointer و EKKO_3D به صورت مستقیم از سربرگ Launch موجود است.

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 امکان‌پذیر است. از جمله این موارد می‌توان به گزینه‌های ترکیب افقی و عمودی داده‌های GPR، 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 و یا حذف قسمتی از داده‌های GPR برای نمایش آنها، تغییر قطبیت ردها، حذف ردهای تکراری و وارد کردن ردهای برداشت نشده اشاره کرد.



شکل الف-۲: انتخاب محدوده‌ای خاص از زمان و مکان مقاطع GPR برای پروفیل‌های مشخص شده که از سربرگ Edit و گزینه Chop data از این سربرگ امکان‌پذیر است.

اولین مرحله از پردازش داده‌ها ساخت یک فهرست از عملیات پردازش است. همان‌طور که در شکل الف-۳ دیده می‌شود، پنجره پردازش در زیر جدول داده‌ها در صفحه اصلی نرم افزار 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 و یا فایل‌های مورد نظر، روند پردازش مربوطه بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. در صورت بروز خطا در اعمال 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-۳ موجود است.



شکل الف-۳: اعمال عملگرهای پردازش که از سربرگ Insert processing امکان پذیر است.

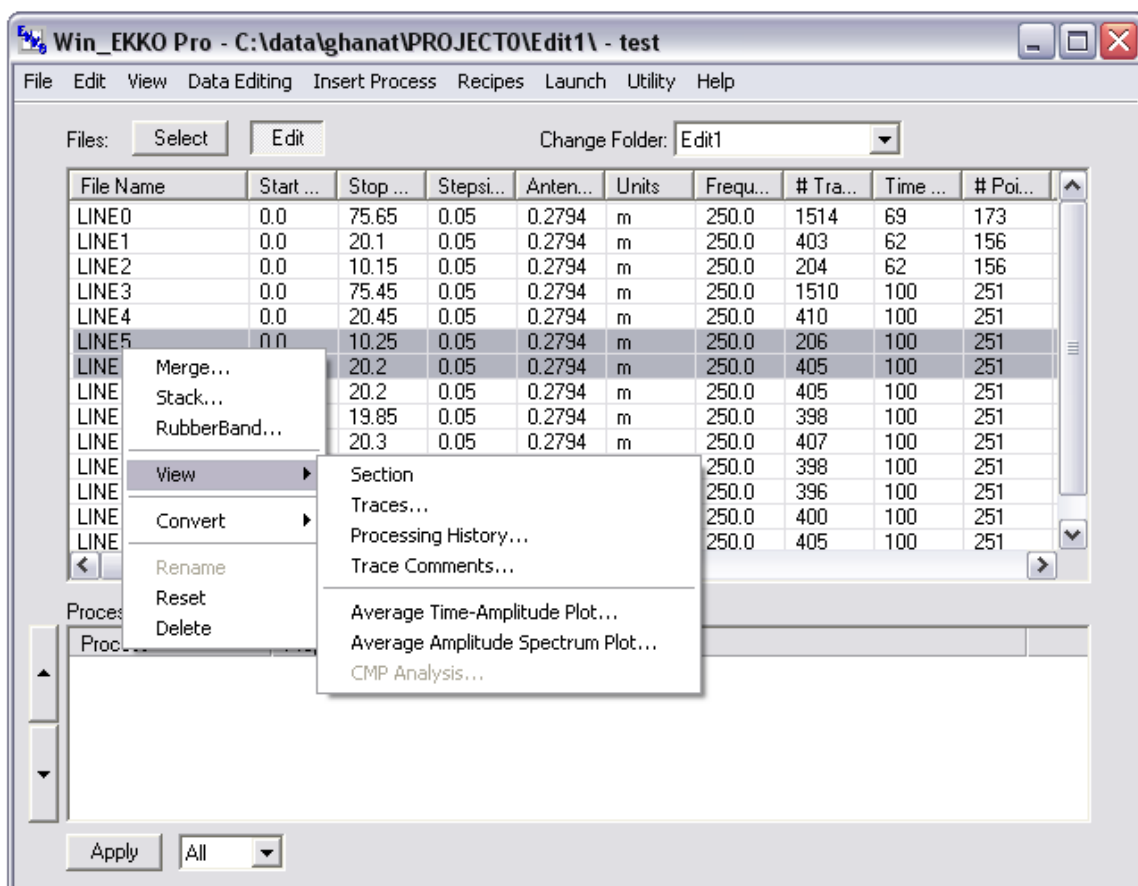
پردازش داده‌ها شامل ۳۰ عملگر پردازش مختلف می‌باشد. از مهمترین این عملگرها می‌توان به انواع بهره‌ها، فیلترهای زمانی نظیر Dewow، فیلترهای بالاگذر، پایین‌گذر و میان‌گذر، انواع فیلترهای مکانی برای حذف بازتاب‌کننده‌های افقی و افزایش اثر بازتاب‌کننده‌های شیب‌دار نظیر بالاگذر، تفاضل‌دها^{۱۲۱} و تفاضل‌زمینه، اشاره کرد. از جمله فیلترهای مکانی دیگر می‌توان فیلتر افقی^{۱۲۲} و پایین‌گذر برای حذف بازتاب‌کننده‌های شیب‌دار و افزایش اثر بازتاب‌کننده‌های افقی را نام برد. این نرم‌افزار قابلیت اعمال پردازش‌هایی نظیر مهاجرت، مشخصه‌های 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 کم‌میسر 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. از جمله کتب ارزشمند در این زمینه می‌توان به منبع شماره ۳۶ در فهرست منابع، اشاره کرد.

نمایش داده‌های GPR با استفاده از سربرگ View امکان‌پذیر است. همچنین همان‌طور که در شکل الف-۴ دیده می‌شود، با راست کلیک بر روی نام پروفیل‌های مورد نظر، مشاهده مقاطع دو بعدی داده‌های GPR، ردهای جداگانه، پردازش‌های بکار 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.

¹²¹ Trace difference

¹²² Horizontal



شکل الف-۴: نمایش داده‌های GPR با راست کلیک بر روی نام فایل مورد نظر امکان پذیر است.

پیوست ب: معرفی نرم افزار EKKO_Mapper, V:2.0

داده‌های GPR معمولاً به صورت مقاطع دو بعدی 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 به صورت 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 بر خلاف 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 داده‌های GPR به سرعت بالایی، امکان‌پذیر است.

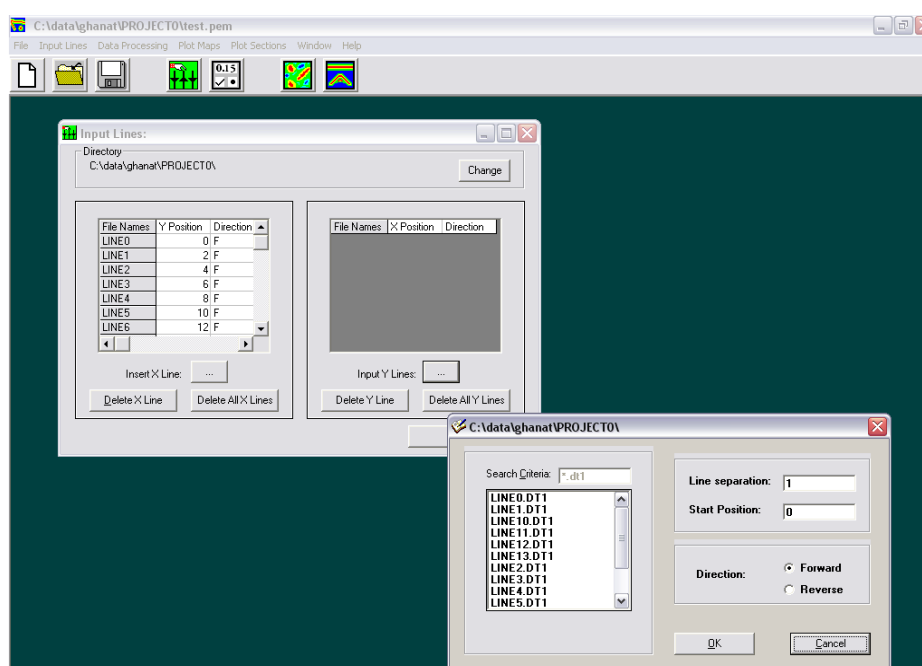
این نرم افزار برای تولید مقاطع افقی از منطقه‌ای که داده‌های آن در شبکه‌ای منظم برداشت شده‌اند، طراحی شده است. این نرم افزار قابلیت تولید نقشه‌های نفوذ امواج، نقشه نوفه‌های محیطی و مقاطع افقی عمقی و زمانی داده‌های GPR را دارا می‌باشد. علاوه بر این، قابلیت اعمال پردازش‌های مختلف بر داده‌ها را دارا می‌باشد.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

برای اینکه داده‌های GPR را بتوان با استفاده از این نرم افزار به صورت مقاطع افقی به نمایش درآورد، 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.

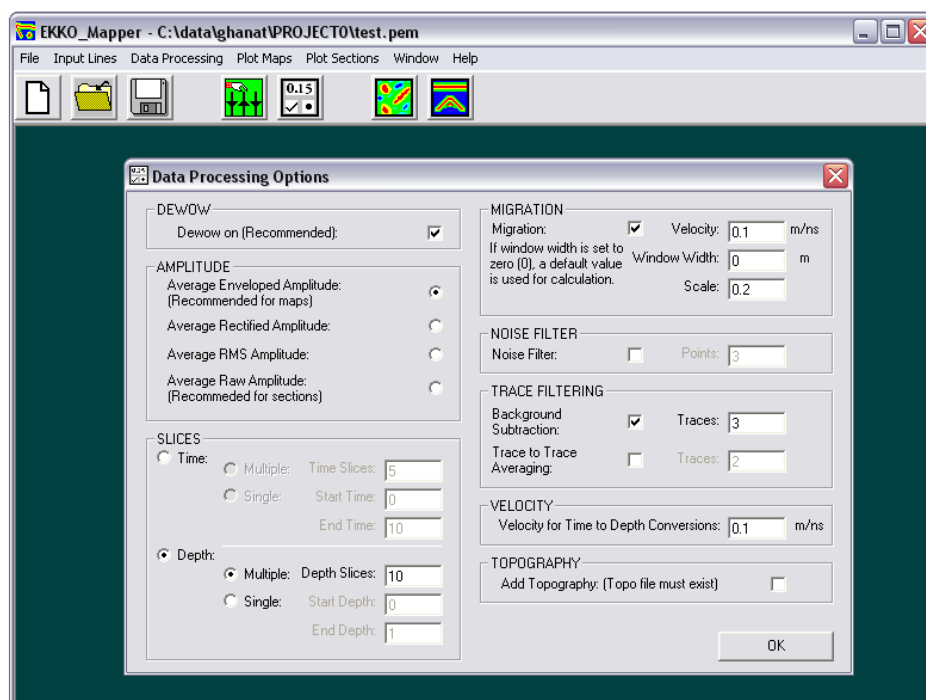
در این نرم افزار بدون اینکه کاربر نقشی در انتخاب روند پردازش داده‌ها داشته باشد با انتخاب عملگرهای پردازش و پارامترهای مناسب برای هر عملگر، یک روند پردازش از پیش تعریف شده توسط شرکت سازنده،

بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. از این رو کاربران غیر مجرب در زمینه پردازش داده‌های GPR نیز با داشتن اطلاعات نسبی در این زمینه، قادر به استفاده از آن می‌باشند.

برای استفاده از این نرم افزار 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 نرم افزار در شکل ب-۱ و ب-۲ به نمایش درآمده، برای کاربر محیا 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 در آمده است. بعد از انتخاب پردازش‌های مناسب با استفاده از سربرگ Plot Maps انتخاب‌های موجود برای تولید نقشه‌های مورد نظر در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.



شکل ب-۱: انتخاب پروفیل‌های برداشتی از یک پروژه برای تولید مقاطع افقی از منطقه برداشت.



شکل ب-۲: پنجره پردازش داده‌ها در نرم افزار EKKO_Mapper

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

پیوست ج: معرفی نرم افزار Transform, V:3.4

این نرم افزار یک نرم افزار علمی و تجسمی^{۱۲۳} قدرتمند از مجموعه نرم افزارهای Fortner بوده که توسط بخش 'NCSA'^{۱۲۴} در دانشگاه ایلینویز^{۱۲۵} توسعه یافته است. توسط این نرم افزار می توان میزان داده های وسیعی را به صورت گرافیکی به نمایش درآورد و به تجزیه و تحلیل آنها پرداخت. این نرم افزار به منظور نمایش و تجزیه و تحلیل دو بعدی داده های با دو متغیر مستقل و یک متغیر وابسته به صورت نقشه های مختلف، طراحی شده است. در ژئوفیزیک به طور گسترده ای با چنین نقشه هایی روبرو هستیم. شبه مقاطع و مقاطع مدل سازی شده مقاومت ویژه و همچنین مقاطع عمقی و زمانی داده های GPR در فصل ۴ و ۵ این پایان نامه از جمله این موارد می باشند. به عنوان مثال در مقاطع عمقی داده های GPR، فواصل ایستگاهی و عمقی متغیر مستقل و دامنه سیگنال GPR، متغیر وابسته می باشد.

توسط این نرم افزار می توان داده ها را به صورت یکی از هفت نمایش گرافیکی زیر نمایش داده و به تحلیل آنها پرداخت.

(۱) تصاویر پیکسلی^{۱۲۶}

(۲) تصاویر درونیابی شده

(۳) نمودارهای خطی

(۴) نقشه های کانتوری^{۱۲۷}

(۵) نقشه های سطحی^{۱۲۸}

(۶) نمودارهای هیستوگرام^{۱۲۹}

(۷) نقشه های برداری^{۱۳۰}

¹²³ Visualization

¹²⁴ National Center for Supercomputing Applications

¹²⁵ Illinois

¹²⁶ Raster images

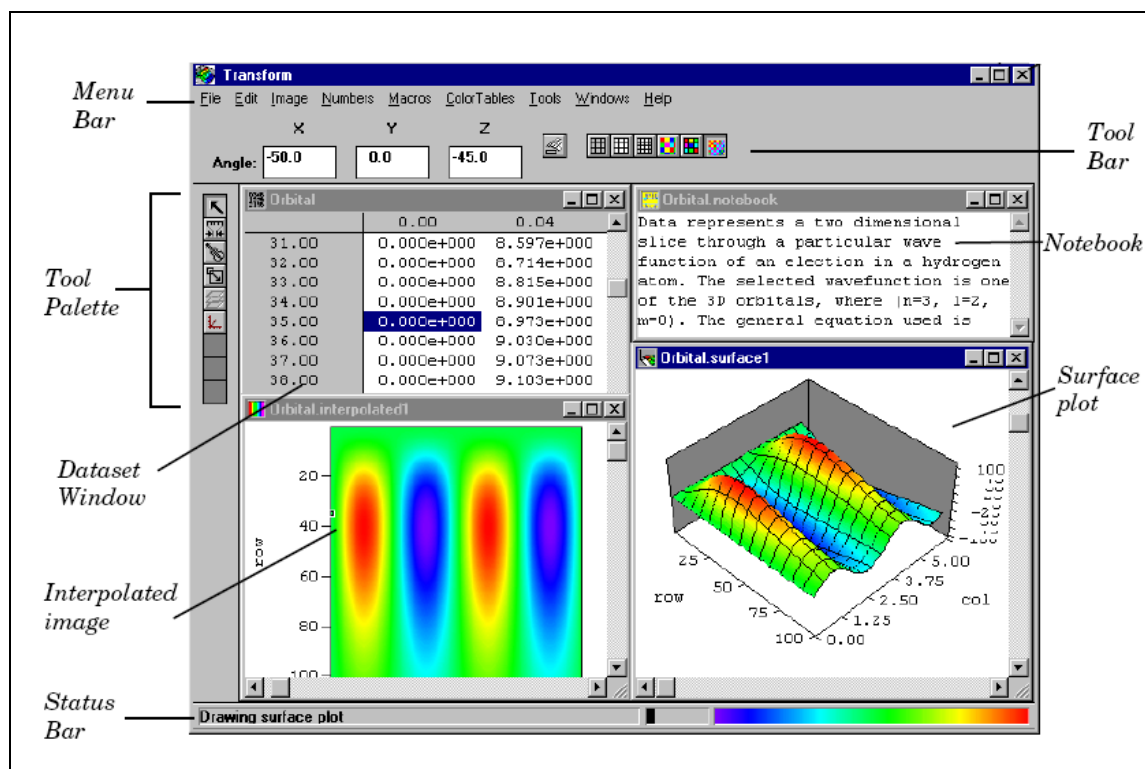
¹²⁷ Contour plots

¹²⁸ Surface plots

¹²⁹ Histogram plots

¹³⁰ Vector plots

از قابلیت‌های این نرم افزار می‌توان به توانایی نمایش چندگانه از داده ۱ و نقشه‌ها اشاره کرد. در شکل ج-۱ صفحه اصلی این نرم افزار به همراه معرفی قسمت‌های مختلف آن آورده شده است. در این شکل دو نمونه از نقشه‌های درونیابی شده و سطحی که در بالا معرفی شد، از یک سری داده اولیه به نمایش درآمده است.



شکل ج-۱: صفحه اصلی نرم افزار Transform و معرفی قسمت‌های مختلف آن.

همان‌طور که در شکل بالا دیده می‌شود نوار منو^{۱۳۱} این نرم افزار از ۹ سربرگ مختلف تشکیل یافته است. نوار ابزار^{۱۳۲} در زیر نوار منو قرار گرفته است. در این نوار اطلاعاتی در خصوص داده‌ها نمایش داده شده و امکان تغییر پاره‌ای از اطلاعات نظیر نام نقشه‌ها و محورها و مقیاس‌های آن و برخی پارامترهای دیگر، برای کاربر موجود است. همان‌طور که در این نوار دیده می‌شود، دکمه‌هایی به صورت افقی لیست شده که با کلیک بر روی هر کدام از آنها امکان‌هایی از تغییرات بر روی داده‌ها در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. دکمه‌های نوار ابزار دستوراتی یکسان با منوی Tools در نوار منو بر داده‌ها اعمال می‌کنند. با اعمال هر کدام از دستورات موجود

¹³¹ Menu bar

¹³² Tool bar

در نوار ابزار، شرح مختصری از دستور بکار رفته در نوار وضعیت^{۱۳۳} به نمایش در می‌آید. انواع دستورات موجود در نوار ابزار توسط ابزارهای انتخابی از لوح ابزار^{۱۳۴} و نوع پنجره فعال، کنترل می‌شوند. به این ترتیب که با انتخاب هر یک از ابزارهای موجود در لوح ابزار و نقشه مورد نظر از منوی Image، دستورات مختلفی در نوار ابزار در اختیار کاربر قرار گرفته و اجازه اعمال عملیاتی خاص بر داده‌ها و یا نقشه‌های پنجره فعال، برای کاربر مهیا می‌گردد.

در شکل ج-۱ نقشه‌های سطحی و درونیابی شده از داده‌های موجود در پنجره داده‌ها، به نمایش درآمده است. نمایش این نقشه‌ها به همراه ۵ شیوه دیگر از نمایش داده‌ها که قبلاً ذکر شد، از منوی Image در نوار منو امکان‌پذیر است.

برای ارائه خلاصه‌ای از مهمترین قابلیت‌های این نرم افزار 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 دادن هر یک از نقشه‌های تولید شده بر روی نقشه‌های دیگر.
 - نمونه‌گیری مجدد از داده‌ها
 - درونیابی و جایگذاری نقاط فراموش شده در یک‌سری از داده‌ها
 - دسترسی و نمایش مقادیر پارامترهای مورد نظر در نقاط مختلف نقشه
 - تولید فرمول، توضیحات و نمادسازی برای داده‌های مختلف
 - بکار بردن توابع درونی بر روی داده‌ها به منظور دستیابی به داده‌های اشتقاقی و فرعی
 - انتقال^{۱۳۵} داده‌های مورد نظر به نرم افزارهای دیگر
- همان‌طور که در طول پایان‌نامه به آن اشاره شد، برای نمایش داده‌های GPR از این نرم افزار استفاده شده است. در صورتی که این نرم افزار در مسیر پیش فرض آن در حافظه کامپیوتر نصب شود، داده‌های تولید شده توسط نرم افزارهایی که در پیوست‌های الف و ب به معرفی آنها پرداختیم، به صورت اتوماتیک به این نرم افزار منتقل می‌شوند. به این ترتیب که با انتخاب گزینه رسم مقطع در نرم افزارهای مزبور داده‌ها به صورت اتوماتیک به این نرم افزار منتقل شده و نقشه‌های درونیابی شده در اختیار کاربر قرار می‌گیرد. کاربر با انتخاب‌هایی که

¹³³ Status bar

¹³⁴ Tool palette

¹³⁵ Export

در نوار منو، نوار ابزار و لوح ابزار در اختیار دارد، مقاطع تولید شده را برای نمایش و تجزیه و تحلیل‌های مورد نظر مهیا می‌سازد.

فهرست منابع

- [۱]. اویسی مؤخر، م.، قاسمی، و.، شاه نظری، ح.، ۱۳۸۴، مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین: دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- [۲]. اویسی مؤخر، م.، ۱۳۸۶، بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش رادار: مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۸۱-۸۹.
- [۳]. پروکیس، جی. جی.، مائولاکیس، دی. جی.، ۱۳۷۹، مقدمه ای بر پردازش سیگنال رقمی، جلد اول، شهاب الملکی، ق.، چاپ اول: انتشارات دانشگاه آزاد.
- [۴]. تلفورد، دبلیو. ام.، جلدات، ال. پی.، شریف، آر. ای.، کیز، دی. ا.، ۱۳۷۵، ژئوفیزیک کاربردی، جلد اول، حاجب حسینی، ح.، زمردیان، ح.، چاپ دوم: انتشارات دانشگاه تهران.
- [۵]. جهانبین، م.، ۱۳۸۶، تعیین موقعیت و شیب گسل پنهان شاهرود، واقع در منطقه کال قرنو با استفاده از دو آرایش قطبی- دوقطبی متقارن، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۶]. حجت، ا.، ۱۳۸۲، مطالعات ژئوالکتریک جهت بررسی آب‌های زیرزمینی و ساختارهای زمین‌شناسی در محدوده آنومالی شماره ۳ معدن سنگ آهن گل گهر، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۷]. صداقت، م.، ۱۳۸۲، زمین و منابع آب، چاپ چهارم: انتشارات دانشگاه پیام نور.
- [۸]. کامکار روحانی، ا. ق.، محمدی ویژه، م.، اویسی مؤخر، م.، ۱۳۸۷، مقایسه روش‌های GPR و مقاومت ویژه در آشکارسازی قنات‌های آب اطراف شاهرود در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا: سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- [۹]. کلاگری، ع. ا.، ۱۳۷۱، اصول اکتشافات ژئوفیزیکی، چاپ اول: انتشارات تابش.

[۱۰]. گوبلو، ه.، ۱۳۷۵، قنات فنی برای دستیابی به آب، سروقد مقدم، ا.ح.، پاپلی یزدی، م.ح.، چاپ اول: معاونت فرهنگی آستان قدس رضوی.

[11]. Annan, A. P., 1999, Practical Processing of GPR Data: Sensors and Software.

[12]. Annan, A. P., 2001, Ground penetrating radar workshop note: Sensors and software.

[13]. Apparao, A., 1997, Developments in geoelectrical methods: A. A. Balkema.

[14]. Davis, J. L., Annan, A. P., 1989, Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: Geophysical Prospect, **3**, 531-551.

[15]. Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P., Cosway, S.W., 1992, Examples of reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles: Geophysics, **57**, 577- 586.

[16]. Fortner Software, 1998, Transform User's Guide and Reference Manual, Fifth edition, Version 3.4.

[17]. Geotomo Software, 2006, Res2dinv, Version 3.55.

[18]. Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., Márquez, A., Lillo, J., López, I., Carreño, F., Martín-González, F., Herrera, R., De Pablo, M.A., 2007, Joint application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging to investigate volcanic materials and structures in Tenerife (Canary Islands, Spain): Journal of Applied Geophysics, **62**, 287-300.

[19]. Kearey, P., Brooks, M., 1991, An Introduction to Geophysical Exploration, Second edition: Blackwell science.

[20]. Knight, R., 2001, Ground penetrating radar for environmental applications: Annu. Rev. Earth Planet. Sci, **29**, 229–255.

[21]. Kofman, R., Ronen, A., Frydman, S., 2006, Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records: Journal of Applied Geophysics, **59**, 284-299.

[22]. Lehmann, F., Green, A.G., 2000, Topographic migration of georadar data: implications for acquisition and processing: Geophysics **65**, 836– 848.

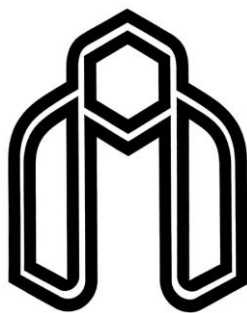
[23]. Loke, M. H., 1999, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys: ABEM.

[24]. Milson, J., 2003, Field geophysics, third edition: John Wiley.

[25]. Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress: Earth-science reviews, **66**, 261-330.

[26]. Parasnis, D. S., 1997, Principles of applied geophysics, fifth edition: Chapman and Hall.

- [27]. Reynolds, J.M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics: John Wiley.
- [28]. Sensors and software, 1999, EKKO_Mapper User's Guide, Version 2.0.
- [29]. Sensors and software, 1999, Ground penetrating radar survey design.
- [30]. Sensors and software, 1999, NOGGIN smart system Users Manual, Version 1.1.
- [31]. Sensors and software, 1999, pulseEKKO crosshole data acquisition Users Guide, Version 1.0.
- [32]. Sensors and software, 1999, pulseEKKO 100 RUN User's Guide, Version 1.2.
- [33]. Sensors and software, 1999, Win_EKKO User's Guide, Version 1.0.
- [34]. Sun, J., Young, R.A., 1995, recognizing surface scattering in ground-penetrating radar data: Geophysics, **60**, 1378-1385.
- [35]. Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E., 1998, Applied geophysics, second edition: Cambridge university press.
- [36]. van der Kruk, J., Slob, E. C., 2004, Reduction of reflections from above surface objects in GPR data: J. Appl. Geophysics, **55**, 271-278.
- [37]. van Overmeeren, R. A., 1994, Georadar for hydrogeology: First break, **8**, 401-408.
- [38]. Xia, J., Franseen, E.K., Miller, R.D., Weis, T.V., Byrnes, A.P., 2003, Improving ground-penetrating radar data in sedimentary rocks using deterministic deconvolution: J. Appl. Geophysics, **54**, 15-33.
- [39]. Yilmaz, Ö., 1987, Seismic Data Processing, vol. 1: Soc. Explor. Geophys.
- [40]. Young, R. A., Sun, J., 1999, Revealing stratigraphy in ground penetrating radar data using domain filtering: Geophysics, **64**, 435-442.
- [41]. Zeng, X., McMechan, G. A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes: Geophysics, **62**, 798-806.
- [42]. www.Googleearth.com
- [43]. www.malags.com
- [44]. www.sensoft.ca



Shahrood University of Technology

Faculty of Mining and Geophysics

MSc Thesis In Exploration Geophysics

**GPR data acquisition, processing and interpretation in shahrood area, and
comparison of results with geoelectrical results in that area**

By:

Mehdi Mohammadi Vizheh

Supervisors:

Dr. Abolghasem Kamkar Rohani

Dr. Mohsen Oveysy

Advisor:

JUN 2008

Abstract

The method of Ground Penetrating Radar (GPR) is one of high resolution geophysical methods that use high frequency electromagnetic waves for detection of shallow subsurface targets. Subsurface waters and buried pipes have a good contrast in their electromagnetic properties with surrounding media. In this study, we have focused on processing and interpretation of GPR data for the detection of the above targets. In order to investigate the advantages and disadvantages of GPR method in comparison with resistivity method, electrical surveys using resistivity method have been carried out in areas containing these subsurface targets. GPR data have been processed using Win_EKKO Pro and EKKO_Mapper software programs, and then, displayed using Transform software. Also for modeling and quantitative interpretation of resistivity data, we have used Res2dinv software.

GPR method has a higher resolution than resistivity method. However, resistivity has not been able to distinct structures near together with high resistivity contrasts. The resolution and especially the depth of penetration of GPR method are affected strongly by subsurface electromagnetic properties. The conductivities of subsurface structures have limited the depth of penetration of GPR method, and detection of water qanat in depth greater than 2 meters has not been possible due to high conductivity of the overburden soil on the qanat. Because of proximity of resistivity of the resistivity of water qanat and surrounding sediments, resistivity method has not considerably been successful in detection of qanat, but has been more successful than GPR method. In detection of sharp boundaries, which electromagnetic properties change rapidly, GPR method has been more successful. Since man-made structure have such boundaries, GPR method remarkably capable of detection of these structures. A

problem that should be noted considerably in use of GPR method is processing of data. The processing of GPR data is carried out considering the expected results. Using correct processing methods on the GPR dataset, we can obtain considerable information from the subsurface.