بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی معدن ، نفت و ژئوفیزیک

مقایسه و تلفیق داده‌های توموگرافی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین (GPR) در اکتشاف لایه‌ها و قنات آب زیرزمینی در منطقه درخانیاب مجن شاهرود

دانشجو:

اسماعیل اسحقی

استاد راهنما:

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور:

دکتر علیرضا عرب‌امیری

شهریور ۱۳۸۹

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد ژئوفیزیک (ژئوالکتریک)

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک

گروه : ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای اسماعیل اسحقی

تحت عنوان:

مقایسه و تلفیق داده‌های توموگرافی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین (GPR) در اکتشاف لایه‌ها و قنات آب زیرزمینی در منطقه درخانیاب مجن شاهرود

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

استاد راهنما	امضاء	استاد مشاور	امضاء
دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی		دکتر علیرضا عرب امیری	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
دکتر ایرج پیروز			
دکتر فرامرز دولتی ارده‌جانی			

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : مهندسی نفت، معدن و ژئوفیزیک

گروه : ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری) آقای/ خانم .   اسماعیل اسحقی..................

تحت عنوان:

مقایسه و تلفیق داده‌های توموگرافی الکتریکی و رادار نفوذی به زمین (GPR) در اکتشاف لایه‌ها و قنات آب زیرزمینی در منطقه درخانیاب مجن شاهرود

در تاریخ .... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد (
رساله دکتری) مورد ارزیابی و با درجه .... مورد پذیرش قرار گرفت.

اساتید راهنما	امضاء	اساتید مشاور	امضاء
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	

اساتید داور	امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء
نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :	
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			
نام و نام خانوادگی :			

تقدیم به

پدر و مادر عزیزتر از جانم

تقدیر و تشکر:

پس از حمد و سپاس الهی بر خود لازم می‌بینم تا از زحمات و کمک‌های بی دریغ دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی به عنوان استاد راهنما و نیز دکتر علیرضا عرب‌امیری به عنوان استاد مشاور خود که راهنمایی‌ها و حمایتهای صادقانه آنها راه سخت انجام این پایان نامه را هموار نمود، تشکر کنم. همچنین از کمک‌های بی بدیل جناب آقایان مهندس زارعی و مهندس کبیریان و آقای شاه حسینی که در هماهنگی و انجام عملیات صحرایی مرا یاری نمودند نیز سپاسگذار باشم. قدردان کمک‌های دوستان خوبم همچون تیمور کهکی، یاسر مهدیزاده، حبیب عشقی، مصطفی استکی و دیگر عزیزانی که در برداشت صحرایی مرا یاری نمودند نیز می‌باشم. در انتها لازم می‌دانم تا از اساتید گرانقدر خود در طول دوره تحصیلی فوق لیسانس یعنی دکتر کامکار روحانی، دکتر پیروز، دکتر دولتی و دکتر مرادزاده که با مساعدت‌های علمی و اخلاقی خود به اینجانب لطف شایانی داشتند، قدردانی کنم.

اینجانب تأیید می نمایم که مطالب مندرج دراین پـایان نامه نتیجه تحقیقات خودم می‌باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده‌ام.

و نیز، کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان-نامه متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

اسماعیل اسحاقی

شهریور ۱۳۸۹

چکیده

روش‌های ژئوفیزیکی از روش‌های اکتشافات زیرسطحی می‌باشد که به دلیل کم‌هزینه و غیر مخرب بودن کاربرد روز افزونی در کارهای مهندسی، باستان شناسی و ... پیدا کرده است. در اکتشافات ژئوفیزیکی معمولا به دنبال یک ناهنجاری یا به زبانی انحراف از مشخصات یکنواخت زمین شناسی هستیم. تغییر ناگهانی در جنس مواد، برخورد به یک گسل یا یک منطقه خرد شده یا لایه‌های آب‌دار می‌توانند ناهنجاری‌هایی نسبت به شرایط طبیعی به حساب آیند. هر یک از روش‌های ژئوفیزیکی دارای نقاط ضعف و قوت مختص به خود هستند که باعث پایین آمدن اعتبار تفسیر آن‌ها می‌شود. حال در صورت تلفیق دو و یا حتی چند روش ژئوفیزیکی با یکدیگر می‌توان تفسیری کامل‌تر و مطمئن‌تر و نیز جزئی‌تر را ارائه داد.

روش توموگرافی الکتریکی از زیرمجموعه‌های روش مقاومت ویژه می‌باشد که در آن با استفاده از تعداد زیاد نقاط برداشت نزدیک به یکدیگر و مدل‌سازی نرم افزاری می‌توان مدلی دقیق از زیر زمین ارائه داد. در مقایسه با دیگر روشهای اندازه‌گیری مرسوم، پی جویی‌های با استفاده از این روش می‌توانند با موفقیت در مناطق با زمین شناسی پیچیده، به خاطر تامین اطلاعات در هر دو جهت قائم و جانبی و تعیین یک حالت کیفی از شکل و عمق اهداف زیرزمینی، مورد استفاده قرار گیرند. روش رادار نفوذی به زمین (GPR) نیز از روش‌های با قدرت تفکیک بالای ژئوفیزیکی است که در آن با ارسال امواج با فرکانس بالا به درون زمین و بررسی بازتاب‌های این امواج به اکتشاف زیرسطحی پرداخته می‌شود. در این روش علت بازتاب امواج ارسالی تباین مشخصات الکترومغناطیسی در مرز لایه‌ها و یا توده‌های زیرسطحی است. در این بررسی با تلفیق این دو روش تلاش شده تا تفسیری کامل‌تر را به دست آورد. همچنین سعی در مقایسه این دو روش و شناسایی نقاط ضعف و قوت هر یک از این روش‌ها شده است. آب زیرزمینی به دلیل اختلاف در مقاومت ویژه و نیز خواص الکتریکی به عنوان هدف مناسبی برای این دو روش شناخته می‌شود، در نتیجه برداشت‌های این دو

روش به منظور بررسی قنات آب صورت گرفت. پس از برداشت پروفیل‌های مشخص و بررسی دوبعدی این دو روش، با برداشت شبکه منظم تفسیر و بررسی سه‌بعدی نیز صورت گرفت.

این دو روش در نمایش قنات، مناطق تحت نفوذ آب و تشخیص نسبی میزان رس و حتی حفرات احتمالی با یکدیگر هم‌پوشانی خوبی داشته و هر کدام نتایج تفسیر با روش دیگر را تایید می‌کند. مناطق حاوی رس و یا تحت تاثیر آب و رطوبت در روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پایین و در روش GPR عمق نفوذ کمتر نسبت به اطراف را نشان می‌دهد. حفرات زیرزمینی حالت برعکس داشته و در این قسمت‌ها مقاومت ویژه بالا رفته و عمق نفوذ امواج GPR نیز افزایش می‌یابد. در مقایسه نیز روش رادار نفوذی به زمین روشی سریعتر با قدرت تفکیک بالاتری نسبت روش توموگرافی الکتریکی نشان داد تا جایی که در بعضی موارد قدرت تفکیک توموگرافی الکتریکی به اندازه ای نبوده که توانایی نمایش قنات را داشته باشد اما GPR با موفقیت و وضوح قنات را مشخص کرده است. به دلیل رسانایی خاک‌های عمق کم و وجود رس، عمق نفوذ روش رادار نفوذی به زمین در این منطقه به شدت کاهش یافته و به ندرت به بیش از ۲ متر می‌رسد. در نتیجه روش توموگرافی الکتریکی در شناسایی اهداف با عمق بیشتر از ۲ متر کاملا موفق‌تر از روش GPR نشان داده است.

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه و کلیات ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- مروری بر مطالعات انجام شده ۳

۱-۳- اهداف پایان نامه ۴

۱-۴- ساختار پایان نامه ۴

فصل دوم: معرفی روش توموگرافی الکتریکی ۶

۲-۱- مقدمه ۷

۲-۲- روش مقاومت ویژه ۷

۲-۲-۱- عوامل موثر بر میزان مقاومت ویژه ۹

۲-۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه ۱۱

۲-۲-۳- آرایه‌های الکتریکی ۱۱

۲-۳- روش توموگرافی الکتریکی ۱۳

۲-۳-۱- برداشت داده‌های توموگرافی الکتریکی ۱۴

۲-۳-۱-۱- برداشت‌های دوبعدی ۱۴

۲-۳-۱-۲- انواع آرایه برای برداشت دوبعدی ۱۶

۲-۳-۱-۳- برداشت‌های سه‌بعدی ۱۷

۲-۳-۱-۴- روش برداشت سه‌بعدی ۱۸

۲-۳-۱-۵- بررسی آرایه‌های برداشت سه‌بعدی ۲۰

۲-۳-۲- مدل‌سازی ۲۱

۲-۳-۲-۱- مدل‌سازی پیشرو ۲۲

۲-۳-۲-۲- مدل‌سازی معکوس ۲۲

۲-۳-۲-۲-۱- روش کمترین مربعات گوس- نیوتن ۲۴

۲-۳-۲-۲-۲- روش شبه نیوتن ۲۶
۲-۳-۳- روش برداشت سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته ۲۹
۲-۳-۴- برداشت‌های توموگرافی در حوزه زمان ۳۰
۲-۳-۵- کاستی‌های روش توموگرافی الکتریکی ۳۱
فصل سوم: معرفی و بررسی روش GPR ۳۲
۳-۱- مقدمه ۳۳
۳-۲- تاریخچه ۳۳
۳-۳- تئوری روش GPR ۳۵
۳-۴- دستگاه GPR ۳۵
۳-۵- انتشار امواج GPR در زمین ۳۷
۳-۵-۱- گذردهی دی‌الکتریک ۳۷
۳-۵-۲- رسانندگی الکتریکی ۳۹
۳-۵-۳- گذردهی مغناطیسی ۴۰
۳-۶- خواص امواج GPR ۴۰
۳-۶-۱- انتشار ۴۰
۳-۶-۲- سرعت ۴۱
۳-۶-۳- کاهش قدرت سیگنال ۴۲
۳-۶-۴- بازتاب و انکسار ۴۳
۳-۶-۵- منطقه گذار ۴۵
۳-۶-۶- عمق نفوذ ۴۵
۳-۶-۷- قدرت تفکیک ۴۷
۳-۷- روش‌های برداشت داده‌های GPR ۴۸
۳-۷-۱- پروفیل‌زنی بازتابی یا دورافت مشترک ۴۸
۳-۷-۲- برداشت CMP/WARR ۴۹

۳-۷-۳- روش Transillumination ۵۰
۳-۸- پردازش داده‌ها ۵۱
۳-۸-۱- تصحیح صفر زمانی ۵۱
۳-۸-۲- تصحیح اشباع سیگنال ۵۲
۳-۸-۳- بهره‌ها ۵۲
۳-۸-۳-۱- کنترل بهره اتوماتیک ۵۲
۳-۸-۳-۲- بهره گسترش و جبران نمایی ۵۳
۳-۸-۳-۳- دیگر بهره‌ها ۵۳
۳-۸-۳-۴- مشخصه پوشش منحنی ۵۴
۳-۹- تفسیر ۵۶
۳-۱۰- کاربردها ۵۷
فصل چهارم: برداشت صحرایی و تفسیر دوبعدی ۵۹
۴-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲- قنات ۶۰
۴-۳- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه ۶۱
۴-۴- عملیات برداشت صحرایی ۶۵
۴-۵- تفسیر داده‌های سونداژ الکتریکی ۷۱
۴-۶- بررسی پروفیل‌های برداشت شده ۷۴
۴-۶-۱- اندازه گیری و مقایسه بر روی پروفیل‌های عمود بر قنات در بخش اول ۷۴
۴-۶-۱-۱- بررسی پروفیل ۱ ..... ۷۵
۴-۶-۱-۲- بررسی پروفیل ۲ ..... ۸۳
۴-۶-۱-۳- تفسیر پروفیل ۳ ..... ۸۶
۴-۶-۲- تفسیر پروفیل‌های عمود بر قنات در بخش دوم ۹۰
۴-۶-۲-۱- تفسیر پروفیل ۴ ..... ۹۰

۴-۶-۲-۲- تفسیر پروفیل ۵ .... ۹۵
۴-۶-۲-۳- تفسیر پروفیل ۶ .... ۱۰۰
۴-۶-۲-۴- تفسیر پروفیل ۷ .... ۱۰۵
۴-۶-۲-۵- تفسیر پروفیل ۸ .... ۱۰۹
۴-۶-۳- تفسیر پروفیل‌های موازی با قنات ۱۱۲
۴-۶-۳-۱- تفسیر پروفیل ۹ .... ۱۱۲
۴-۶-۳-۲- تفسیر پروفیل ۱۰ .... ۱۱۶
۴-۶-۳-۳- تفسیر پروفیل ۱۱ .... ۱۱۹
۴-۶-۳-۴- تفسیر پروفیل ۱۲ .... ۱۲۱
فصل پنجم: تصویرسازی و مدل‌سازی سه‌بعدی ۱۲۴
۵-۱- مقدمه ۱۲۵
۵-۲- بررسی و تفسیر سه‌بعدی توموگرافی الکتریکی ۱۲۵
۶-۳- نمایش سه‌بعدی محیط پیرامون قنات ۱۲۹
۵-۴- بررسی و تفسیر سه‌بعدی داده‌های GPR ۱۳۱
فصل ششم: بحث، نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۳۶
۶-۱- بحث و نتیجه‌گیری ۱۳۷
۶-۲- پیشنهادات ۱۴۲
فصل هفتم: منابع و مراجع ۱۴۳

فهرست اشکال

شکل ۲-۱- چگونگی اندازه گیری مقاومت ویژه در روش ژئوالکتریک ۸
شکل ۲-۲- مرسوم‌ترین آرایه‌های الکتریکی در برداشت مقاومت ویژه به همراه فاکتور هندسی آنها ۱۲
شکل ۲-۳- خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل الکتریکی برای آرایش الکترودی متقارن شلومبرژه ۱۲
شکل ۲-۴- روش و توالی اندازه‌گیری برای یک برداشت دوبعدی ۱۵
شکل ۲-۵- آرایش الکترودها برای یک برداشت سه‌بعدی ۱۸
شکل ۲-۶- روش‌های برداشت سه‌بعدی ۱۹
شکل ۲-۷- روند تخمین مدل به وسیله معکوس سازی ۲۳
شکل ۲-۸- ترتیب بلوک‌های مستطیلی مورد استفاده در مدل‌سازی سه‌بعدی ۲۴
شکل ۳-۱- تعداد مقاله‌های تحقیقاتی GPR طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ ۳۴
شکل ۳-۲- اجزا دستگاه GPR و اهداف قابل شناسایی آن ۳۶
شکل ۳-۳- ردپای موج ۴۱
شکل ۳-۴- نسبت سرعت‌های رادار و حفرات ۴۲
شکل ۳-۵- روش پروفیل زنی ۴۹
شکل ۳-۶- روش CMP ۵۰
شکل ۳-۷- روش Transillumination ۵۱
شکل ۳-۸- پالس‌های ارسالی GPR ۵۴
شکل ۳-۹- مقطع یک برداشت صحرایی بدون اعمال پردازش envelope ۵۵
شکل ۳-۱۰- مقطع یک برداشت صحرایی پس از اعمال پردازش envelope ۵۶
شکل ۴-۱- قسمت‌های مختلف قنات ۶۱
شکل ۴-۲- موقعیت جغرافیایی منطقه برداشت ۶۲
شکل ۴-۳- نمایی از محل برداشت و ارتفاعات اطراف منطقه برداشت ۶۴
شکل ۴-۴- نقشه زمین شناسی منطقه ۶۵
شکل ۴-۵- نمای هوایی از محل برداشت داده‌ها و محل برداشت پروفیل‌ها و سونداژ ۶۷

شکل ۴-۶- مدل نهایی به دست آمده با نرم افزار IX1D ۷۲

شکل ۴-۷- مدل نهایی به دست آمده با نرم افزار VES ۷۳

شکل ۴-۸- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۱ .... ۷۶

شکل ۴-۹- مقطع زمانی پروفیل ۱ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک ۷۸

شکل ۴-۱۰- مقطع عمقی پروفیل ۱ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک ۸۰

شکل ۴-۱۱- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۲ .... ۸۴

شکل ۴-۱۲- مقطع عمقی پروفیل ۲ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره AGC ۸۵

شکل ۴-۱۳- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۳ .... ۸۸

شکل ۴-۱۴- مقطع عمقی پروفیل ۳ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره AGC ۸۹

شکل ۴-۱۵- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۴ .... ۹۱

شکل ۴-۱۶- مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره Constant ۹۳

شکل ۴-۱۷- مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر DEWOW و مشخصه envelope ۹۴

شکل ۴-۱۸- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۵ .... ۹۶

شکل ۴-۱۹- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۵ .... ۹۸

شکل ۴-۲۰- مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره SEC ۹۹

شکل ۴-۲۱- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۶ .... ۱۰۱

شکل ۴-۲۲- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۶ .... ۱۰۳

شکل ۴-۲۳- مقطع عمقی پروفیل ۶ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک ۱۰۴

شکل ۴-۲۴- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۷ .... ۱۰۶

شکل ۴-۲۵- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۷ .... ۱۰۷

شکل ۴-۲۶- مقطع عمقی پروفیل ۷ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک ۱۰۸

شکل ۴-۲۷- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۸ .... ۱۱۰

شکل ۴-۲۸- مقطع عمقی پروفیل ۸ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره AGC ۱۱۱

شکل ۴-۲۹- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۹ .... ۱۱۳

شکل ۴-۳۰- مقطع عمقی پروفیل ۹ با اعمال فیلتر DEWOW و مشخصه Envelope ۱۱۴

شکل ۴-۳۱- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۱۰ .... ۱۱۷

شکل ۴-۳۲- مقطع عمقی پروفیل ۱۰ با اعمال فیلتر DEWOW و مشخصه Envelope ۱۱۸

شکل ۴-۳۳- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۱۱ .... ۱۲۰

شکل ۴-۳۴- شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی پروفیل ۱۲ ....۱۲۲

شکل ۵-۱- نمایش سه‌بعدی مقطع توموگرافی الکتریکی ۱۲۶

شکل ۵-۲- مقاطع سه‌بعدی مقاومت ویژه ۱۲۸

شکل ۵-۳- نمایش سه‌بعدی داده‌های مقطع RES3DINV ۱۳۰

شکل ۵-۴- میانگین دامنه سیگنال برای اعماق مختلف با نرم افزار EKKO-Mapper ۱۳۲

شکل ۵-۵- مقطع سه‌بعدی داده‌های GPR ۱۳۳

شکل ۵-۶- برش‌های عرضی از مقاطع سه‌بعدی داده‌های GPR ۱۳۵

شکل ۶-۱- نمایش قنات با مقطع مدل سازی GPR و توموگرافی الکتریکی در پروفیل ۲ .... ۱۳۸

شکل ۶-۲: اثر ابعاد ذرات، میزان رس و رطوبت بر روی مقطع GPR و توموگرافی الکتریکی از پروفیل ۳ .... ۱۳۹

شکل ۶-۳: توانایی دو روش GPR و توموگرافی الکتریکی در نمایش قنات در عمق بالا برای پروفیل ۸ ...... ۱۴۰

شکل ۶-۴: بررسی تعیین لایه بندی برای روش GPR و توموگرافی الکتریکی برای پروفیل ۱۰ .... ۱۴۱

فهرست جداول

جدول ۲-۱- مقاومت ویژه برخی از انواع سنگ، آب و خاک ۱۰

جدول ۳-۱- مقادیر ثابت دی‌الکتریک، سرعت، اتلاف انرژی و رسانندگی برای مواد مختلف ۳۹

جدول ۳-۲- گذردهی نسبی محیط‌های مختلف به همراه ضرایب بازتاب ۴۴

جدول ۳-۳- تاثیر فرکانس بر روی عمق نفوذ و قدرت تفکیک ۴۷

جدول ۴-۱- نتایج حاصل از تفسیر سونداژ به کمک روش‌های مختلف ۷۴

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

ژئوفیزیک را می‌توان جادوی فیزیک در زمین دانست. بدون آنکه از درون زمین پیچیده خبر دقیقی در دست باشد، با برداشت‌های نسبتاً ساده و به دنبال آن تفسیرهای اصولی، می‌توان اطلاعات بسیار مهم و ارزشمندی را با صرف هزینه و زمانی اندک، از زیر زمین بدست آورد. ژئوفیزیک دارای روش‌های مختلفی می‌باشد که هر یک از این روش‌ها نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود را دارند که می‌تواند اعتماد به تفسیرهای ژئوفیزیکی را تا حدودی کاهش دهد. حال با تلفیق دو یا چند روش ژئوفیزیکی و استفاده از نقاط قوت هر یک از این روش‌ها می‌توان به تفسیری دقیق‌تر با اعتبار بالاتری رسید.

روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه (ERT[۱]) از روش‌های مقاومت ویژه می‌باشد که معمولاً جهت اکتشاف هیدروژئولوژیکی، معدنی، ژئوتکنیکی و نیز مطالعات زیست‌محیطی مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های مقاومت الکتریکی زیرسطحی، مواد مدفون و نیز الگوهای مختلف هیدروژئولوژیکی و زمین شناسی را می‌توانند به خوبی ثبت نمایند. هدف از توموگرافی الکتریکی ایجاد تصویری از خصوصیات الکتریکی زمین است. امروزه پیشرفت سریع تجهیزات و نرم‌افزارهای ژئوالکتریکی اجازه استفاده از الگوهای مشاهداتی دوبعدی و سه‌بعدی را فراهم نموده است، لذا روش توموگرافی الکتریکی کاربرد زیادی یافته است.

روش رادار نفوذی به زمین (GPR[۲]) نیز از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی می‌باشد که در آن با ارسال امواج الکترومغناطیس به درون زمین و بررسی بازتاب این امواج، به اکتشاف اهداف زیرزمینی مانند لوله‌ها، حفرات مدفون، لایه‌بندی‌های زیرسطحی و غیره پرداخته می‌شود.

---

[1] Electrical resistivity tomography
[2] Ground penetrating radar

در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از خصوصیات هر یک از این روش‌ها مانند قدرت تفکیک بالای روش GPR و عمق نفوذ بالاتر روش توموگرافی الکتریکی راهکاری کامل‌تر برای شناسایی یک قنات آب ارائه شود.

۱-۲- مروری بر مطالعات انجام شده

تعداد مقالاتی که پیرامون روش‌های توموگرافی الکتریکی و یا GPR ارائه شده فراوان است؛ اما در ادامه به منظور پرهیز از طولانی شدن بحث، تنها به ذکر چند مورد تحقیق که با استفاده از تلفیق این دو روش صورت گرفته اشاره خواهد شد.

در سال ۲۰۰۳ "بیوویس[1]" و همکارانش با تلفیق دو روش توموگرافی الکتریکی و GPR به شناسایی سنگ‌های هوازده در کشور سنگال پرداختند [Beauvais et al, 2003]. در سال ۲۰۰۵ "لوچی[2] " حفرات زیر ساختی در یک کلیسا را در ایتالیا با تلفیق این دو روش شناسایی نمود [Leucci, 2005]. در همین سال "کادی[3]" و همکارانش با استفاده از این دو روش حفرات زیر سطحی در شهر "العمل" در کشور مصر را شناسایی کردند [Qady et al, 2005]. در سال ۲۰۰۷ نیز "اورتیز[4]" و همکارانش به همین طریق به شناسایی سنگ‌های آتشفشانی در جزایر قناری اسپانیا پرداختند [Ortiz et al, 2007]. وجود حفرات زیرسطحی و نیز تغییر جنس ساختارها در این دو روش هدفی مناسب به شمار می‌آید. در تمامی این موارد هر یک از این روش‌ها نقطه ضعف روش دیگر را پوشش داده و با استفاده از تلفیق این دو روش تا حدود زیادی کیفیت و اطمینان تفسیر بالا رفته است. ذکر چند نمونه تحقیق بالا نشانگر به روز بودن این بررسی ها در دنیا دارد.

---

1 Beauvais
2 Leucci
3 Qady
4 Ortiz

در ایران نیز روش توموگرافی الکتریکی به دلیل موفقیت در زمین‌های پیچیده بیشتر برای اکتشاف آب در کارست استفاده شده است. روش GPR نیز در طی چند سال اخیر کاربرد روزافزونی پیدا کرده است و از حالت تحقیقات دانشگاهی به سمت کاربردهای مختلف مهندسی و غیره سوق پیدا کرده است. در اینجا ذکر این موضوع نیز ضروری است که تلفیق این دو روش در تحقیق حاضر برای اولین بار در ایران انجام می‌پذیرد.

۱-۳- اهداف پایان نامه

از اهداف اصلی این پایان نامه می‌توان به معرفی دو روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه و GPR و پردازش و تفسیر این روش‌ها اشاره کرد. با انجام برداشت‌های متوالی در موقعیت‌های مختلف، سعی در بررسی موفقیت این دو روش در محیط‌های مختلف شده است.

در این پایان نامه سعی شده تا این دو روش از لحاظ قدرت تفکیک، عمق نفوذ، سرعت برداشت داده‌ها و مقدار اطلاعات به دست آمده با یکدیگر مقایسه و مزایا و معایب این دو روش شناسایی گردند. علاوه بر موارد فوق تلاش شده تا با تلفیق این دو روش تفسیری مطمئن‌تری ارائه شود.

۱-۴- ساختار پایان نامه

پایان نامه پیش رو مشتمل بر شش فصل است. فصل اول (فصل حاضر)، شامل مقدمه، مروری بر مطالعات انجام شده و اهداف پایان نامه می‌باشد. در فصل دوم به معرفی روش‌های مقاومت ویژه و توموگرافی الکتریکی پرداخته می‌شود. در این فصل انواع آرایه‌ها و مزایا و معایب هر یک بیان

شده، روش‌های برداشت مرسوم معرفی گردیده و در نهایت به منظور نتیجه گیری مطلوب از برداشت، انواع روش های مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است. فصل سوم به بررسی روش GPR، کاربردهای این روش، تئوری انتشار امواج الکترومغناطیس و پردازش‌های مرسوم بر روی داده‌های به دست آمده از این روش اختصاص دارد. فصل چهارم به معرفی منطقه مورد مطالعه، اهداف طراحی شبکه برداشت اختصاص دارد. در ادامه این بخش به تفسیر و مدل‌سازی دوبعدی داده‌ها پرداخته شده است. فصل پنجم نیز به مدل‌سازی سه‌بعدی[1] داده‌های توموگرافی الکتریکی و GPR اختصاص دارد. در نهایت و در فصل ششم نتیجه گیری و پیشنهادات مرتبط با این تحقیق آورده شده است.

[1] 3-D modelling

فصل دوم

معرفی روش توموگرافی الکتریکی

۲-۱- مقدمه

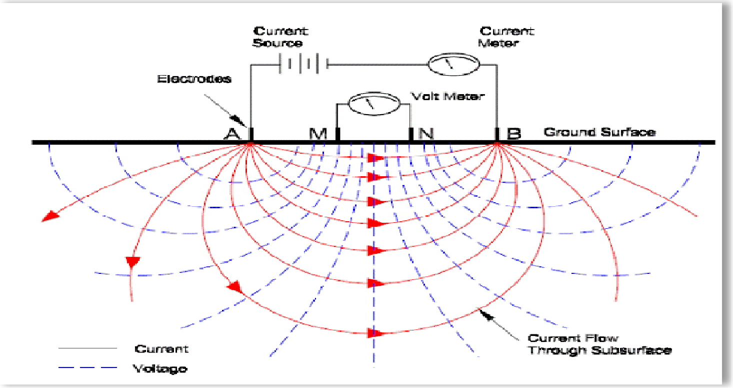
روش توموگرافی الکتریکی یکی از روش‌های مقاومت ویـژه بـا دقـت تفسـیر بـالا مـی‌باشـد [Leucci, 2004]. در این روش برداشت‌هـای مقاومـت ویـژه در یـک شـبکه مـنظم بـه وسـیله آرایـه الکترودی بهینه انجام گرفته و سپس با استفاده از مدل‌سازی، مقطع عمقـی منطقـه مـورد مطالعـه در اختیار قرار می‌گیرد. برای معرفی کامل‌تر روش توموگرافی الکتریکـی معرفـی روش مقاومـت ویـژه در ابتدا ضروری به نظر می‌رسد. پس از معرفی روش مقاومت ویژه، بررسی روش توموگرافی الکتریکـی بـه مراتب آسان‌تر می‌باشد.

۲-۲- روش مقاومت ویژه

در این روش مقاومت ویژه الکتریکی زمین از طریق وارد نمودن جریان الکتریکی مستقیم به داخل آن و تعیین پتانسیل الکتریکی تولید شده در سطح، اندازه‌گیـری مـی‌شـود. بـا اسـتفاده از ایـن روش، خصوصیات الکتریکی زمین و به تبع آن ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقـه قابـل اسـتنباط اسـت [Corvallis, 2000]. ایـن روش در سـطح وسـیعی در اکتشـاف منـابع آب زیرزمینـی، بررسـی انـواع آلودگی‌های آب‌های زیرزمینی، آشکارسازی محل حفره‌های زیرسطحی، گسل‌هـا، منـاطق خـرد شـده، مسائل مهندسی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد [Reynolds, 1997].

در روش مقاومت ویژه الکتریکی مطابق شکل ۲-۱، شـدت جریـان I بـه وسـیله دو الکتـرود فلزی (الکترودهای A و B) به داخل زمین تزریق می‌شود. جریان ارسالی به صورت یـک نـیم کـره در داخل زمین انتشار می‌یابد. پس از تزریق جریان، اختلاف پتانسیل در دو نقطه مشخص بـه وسـیله دو الکترود دیگر (الکترودهای M و N) قرائت می‌گردد.

الکترودهایی که جریان I را به داخل زمین تزریق می‌کنند (الکترودهای A و B) الکترود جریان و دو الکترود دیگر که اختلاف پتانسیل را قرائت می‌کنند (الکترودهای M و N)، الکترود پتانسیل نامیده می‌شوند.



شکل ۲-۱: چگونگی اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی زمین در روش ژئوالکتریک [Corvallis, 2000]

از آنجا که در هر اندازه‌گیری شدت جریان ارسالی به داخل زمین، اختلاف پتانسیل و موقعیت هندسی الکترودها مشخص می‌باشد؛ در نتیجه پارامتر مقاومت ویژه ظاهری[1] به صورت زیر تعریف می‌شود[Asfahani, 2007]:

$$\rho_a = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM}-\frac{1}{BM}-\frac{1}{AN}+\frac{1}{BN}}\frac{\Delta V}{I} \qquad (۲-۱)$$

در این رابطه I شدت جریان ارسالی (بر حسب آمپر)، ΔV اختلاف پتانسیل قرائت شده (بر حسب ولت) و ρ_a مقدار مقاومت ویژه ظاهری (بر حسب اهم متر) می‌باشد. در معادله ۱-۱ مجموعه‌ای که در نسبت $\Delta V/I$ ضرب می‌شود، ضریب هندسی نامیده می‌شود. ضریب هندسی برای تبدیل

[1] Apparent Resistivity

مقاومت ($R=\Delta V/I$) به مقاومت‌ویژه به کار می‌رود. مقاومت ویژه ظاهری در حقیقت مقاومت قسمتی از زمین با ابعاد واحد (۱ متر) است و در تفسیر داده‌ها به عنوان داده اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرد [Marescot, …].

۲-۲-۱- عوامل موثر بر میزان مقاومت ویژه ظاهری

عوامل متعددی بر مقدار مقاومت ویژه در یک برداشت موثر است. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- جنس لایه‌های زیرسطحی: یکی از مهم‌ترین کاربردهای روش مقاومت ویژه در شناسایی جنس لایه‌ها و توده‌های زیرزمینی می‌باشد. این توانایی از آن جهت حاصل می‌شود که هر ماده مقاومت ویژه مخصوص به خود دارد به عنوان مثال در مورد جنس سنگ‌ها، سنگ‌های آذرین و دگرگونی مقاومت ویژه بالاتری نسبت به سنگ‌های رسوبی دارند و یا وجود رس مقاومت ویژه را کاهش می‌دهد. بدین ترتیب با قرائت مقاومت ویژه در هر برداشت و با کمک اطلاعات زمین‌شناسی می‌توان به طور تقریبی جنس ماده زیرسطحی را تعیین کرد.

۲- میزان آب موجود در خلل و فرج سنگ‌ها و خاک‌های زیرسطحی: به دلیل آنکه آب به عنوان یک رسانای خوب در طبیعت موجود است، با افزایش میزان آب در لایه‌های زیرسطحی، مقاومت ویژه این لایه‌ها کاهش می‌یابد. روش مقاومت ویژه به دلیل وجود این خاصیت یکی از موفق‌ترین روش‌های اکتشاف آب‌های زیرزمینی می‌باشد.

دو عامل بالا را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عوامل تعیین کننده مقاومت ویژه ذکر کرد. با این حال علاوه بر این عوامل، عوامل زیاد دیگری در میزان مقاومت ویژه نقش دارند که برخی از آنها عبارتند از: میزان شوری آب موجود در سازند، میزان خلل و فرج موجود در سنگ، وجود

شکستگی‌ها در سنگ‌ها، وجود کانسارهای رسانا در بطن سنگ میزبان، درجه حرارت، نفوذپذیری، اندازه رسوبات و غیره [Marescot, ...]. در جدول ۲-۱ مقاومت ویژه برخی از انواع مواد و رسوبات نشان داده شده است.

جدول ۲-۱: مقاومت ویژه برخی از انواع سنگ، آب و خاک [Domenico and Schwartz, 1998]

مواد معمول زمین شناسی	مقاومت ویژه (اهم متر)
آهک‌های آسماری	≥۱۰۰۰ - ۵۰۰
آهک‌های کرتاسه	۵۰۰ - ۲۰۰
ماسه سنگ کوارتزیت	۵۰۰ – ۳۰۰
خاکستر (برش) آتشفشانی	۱۰۰ – ۲۰
آب زیرزمینی	۱۰۰ – ۱۰
آب دریا	۰/۲
سنگ آهک	۵۰۰۰ – ۵۰
شیل	۲۰۰۰ – ۲۰
رس	۱۰۰ – ۱
آبرفت‌های دانه درشت و کنگلومرا	۱۰۰۰۰ – ۳۰۰
آبرفت‌های دانه متوسط	۳۰۰ – ۱۰۰
آبرفت‌های دانه ریز	۱۰۰ – ۵۰
شن و ماسه خشک	۱۰۰۰۰ – ۱۰۰۰
شن و ماسه اشباع از آب شیرین	۵۰۰ – ۵۰
شن و ماسه اشباع از آب شور	۵ – ۰/۵

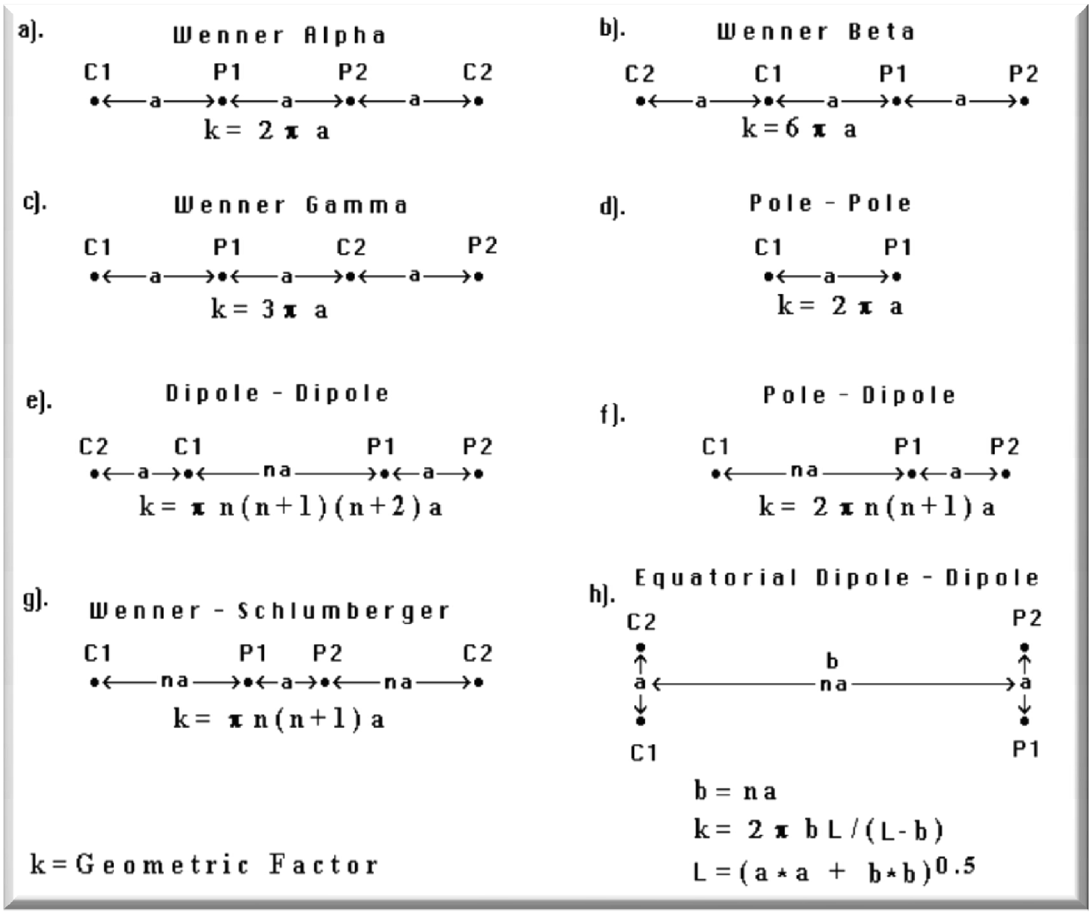
۲-۲-۲- روش‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه

در حالت کلی داده‌های مقاومت ویژه با اهداف مدل سازی به صورت یک بعدی، دوبعدی و سه بعدی برداشت می‌شوند [Loke, 1999]. اما در حالت کلی این برداشت‌ها به دو شکل عمده انجام می‌گیرد. یکی از این روش ها، روش گمانه زنی الکتریکی[1] نامیده می شود؛ که در آن یک نقطه به صورت عمقی مورد بررسی قرار می‌گیرد و با نام سونداژزنی الکتریکی قائم (VES[2]) نیز شناخته می‌شود. برای اجرای این روش معمولاً از آرایش شلومبرگر[3] استفاده می‌گردد. اما روش دوم، روش پروفیل زنی[4] می‌باشد که برای تشخیص تغییرات جانبی مقادیر مقاومت ویژه زیر سطحی مورد استفاده قرار می گیرد [Loke, 2004].

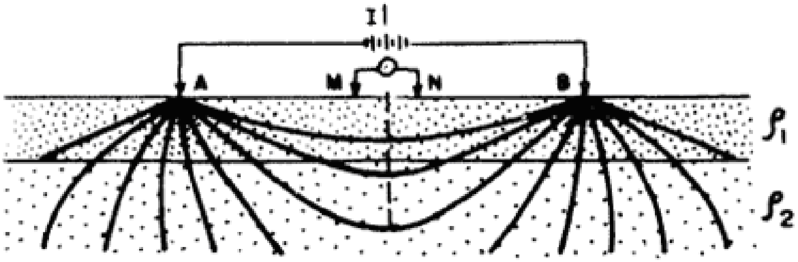
۲-۲-۳- آرایه‌های الکتریکی[5]

برای هر برداشت مقاومت ویژه به ۴ الکترود نیاز است. از این چهار الکترود، دو الکترود به عنوان الکترود جریان و دو الکترود به عنوان الکترود پتانسیل عمل می‌کنند. چگونگی قرار گرفتن الکترودهای فرستنده و گیرنده جریان را نسبت به یکدیگر آرایه الکترودی می گویند . آرایش‌های الکترودی دارای انواع مختلفی می‌باشد که برخی از مهمترین آنها به همراه فاکتور هندسی هر آرایه در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. در شکل ۲-۳ نیز آرایش شلومبرگر و خطوط جریان برای این آرایش در زیر زمین مشاهده می‌شود.

---
1 Electrical sounding
2 Vertical electric sounding
3 Schlumberger
4 Profiling
5 Electrical arrays



شکل ۲-۲: مرسوم‌ترین آرایه‌های الکتریکی در برداشت مقاومت ویژه به همراه فاکتور هندسی آنها [Loke, 2004]



شکل ۲-۳: خطوط جریان و سطوح هم پتانسیل الکتریکی برای آرایش الکترودی متقارن شلومبرژه [Ginzburg and Levanon, 1976]

انتخاب بهترین آرایه برای یک برداشت صحرایی به نوع ساختار زیرسطحی، حساسیت اندازه‌گیرنده مقاومت ویژه و سطح نوفه[1] زمینه بستگی دارد. از جمله خصوصیات یک آرایه که می‌تواند مهم باشد؛ عبارتند از: الف) عمق بررسی ب) حساسیت آرایه به تغییرات جانبی و قائم در مقاومت ویژه زیرسطحی ج) پوشش داده‌های افقی و د) شدت (قدرت) سیگنال [Loke, 2004].

در برداشت‌های سونداژزنی، آرایش شلومبرگر نسبت به دیگر آرایش‌ها کاربردی تر است. آرایه هایی که بیشترین کاربرد را برای برداشت های دوبعدی[2] دارند، ۱) ونر ۲) دوقطبی-دوقطبی ۳) ونر-شلومبرگر ۴) قطبی-قطبی ۵) قطبی-دوقطبی هستند [Loke, 2004].

۲-۳- روش توموگرافی الکتریکی

این روش ژئوالکتریکی یک روش نسبتاً جدید با برداشت بهینه می باشد که به منظور بهبود، افزایش دقت، قدرت تفکیک عمقی (قائم) و جانبی (افقی) در شناسایی اهداف زیرزمینی به صورت دوبعدی و سه بعدی کاربرد دارد. هدف از توموگرافی الکتریکی ایجاد تصاویری از خصوصیات الکتریکی زیرسطح زمین می باشد.

در دهه‌های اخیر برداشت‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه[3] (ERT) به طور گسترده-ای در بررسی‌های ژئوفیزیکی مورد استفاده قرار گرفته است [Dahlin and Zhou, 2001]. این برداشت‌ها برای به نقشه در آوردن مناطق با زمین شناسی زیر سطحی پیچیده که در آنها، برداشت های پروفیل‌زنی و سونداژزنی معمولی کارایی چندانی ندارند و به منظور تامین اطلاعات در هر دو جهت قائم و جانبی و تعیین یک حالت کیفی از شکل و عمق اهداف زیرزمینی، مورد استفاده قرار

[1] noise
[2] Electrical Imaging Surveys
[3] Electrical resistivity tomography

می‌گیرند [Griffiths and Barker, 1993]. این بررسی‌ها عموماً جهت اکتشاف هیدروژئولوژیکی، معدنی، ژئوتکنیکی و نیز مطالعات زیست محیطی مورد استفاده می‌باشند [Reynolds, 1997].

روش توموگرافی را می‌توان در دو بخش طراحی شبکه وچگونگی برداشت داده‌ها و نیز مدل‌سازی داده‌های برداشت شده مورد بررسی قرار داد [Zhou and Greenhalgh, 2002].

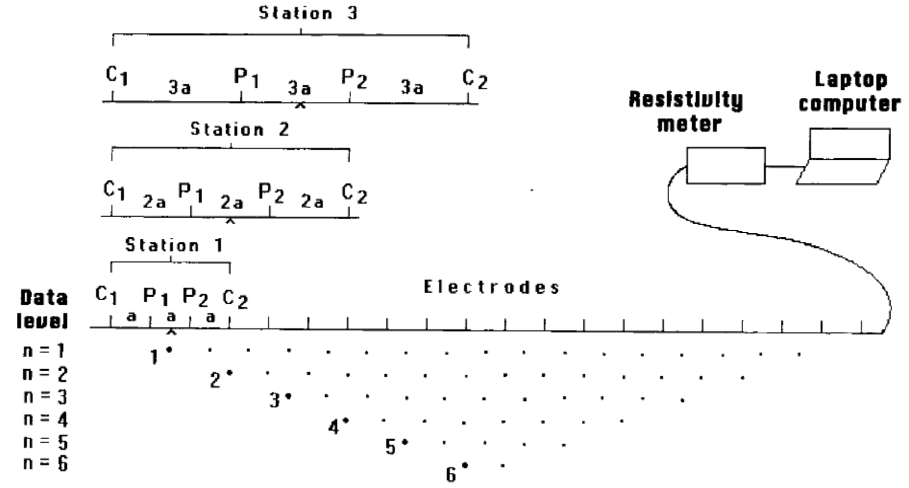
۲-۳-۱- برداشت داده‌های توموگرافی

برداشت های مرسوم توموگرافی الکتریکی به دو نوع برداشت دوبعدی (2D) و برداشت سه بعدی (3D) خلاصه می شوند.

۲-۳-۱-۱- برداشت‌های دوبعدی

در برداشت‌های دوبعدی، مقاومت‌ویژه در جهت قائم همچون جهت افقی در طول خط برداشت تغییر می‌کند. در بسیاری موقعیت‌های زمین شناسی، برداشت‌های دوبعدی می‌توانند نتایج مفیدی را که مکمل اطلاعات گرفته شده از روش‌های دیگر ژئوفیزیکی می‌باشد، در اختیار مفسر بگذارد. به عنوان مثال روش‌های لرزه‌ای می‌توانند فواصل امواج را به خوبی به نقشه درآورند؛ اما در به نقشه درآوردن توده‌های جدا از هم مانند تخته سنگ‌ها، حفرات و توده‌های آلوده با مشکل مواجه می‌شود. برداشت‌های رادار زمینی می‌توانند تصاویری با جزئیات بیشتری را در اختیار قرار دهند؛ اما عمق نفوذ بسیار محدودی در مناطقی با رسوبات غیر یکپارچه رسانا مانند خاک‌های رسی دارند. از دیگر سوی، برداشت‌های الکتریکی دوبعدی می‌توانند در ترکیب با برداشت‌های لرزه‌ای یا رادار نفوذی به زمین به منظور تهیه اطلاعات مکمل به کار گرفته شوند [Loke, 2004].

برداشت‌های توموگرافی/تصویرسازی الکتریکی[1] دوبعدی معمولاً با استفاده از تعداد زیادی الکترود (بیش از بیست و پنج الکترود)، در ارتباط با یک کابل چند هسته‌ای انجام می‌گیرد. یک کنترل کننده اتوماتیک، چهار الکترود مرتبط در هر برداشت را انتخاب می‌کند (شکل ۲-۴). در برداشت‌های دوبعدی فرض بر این است که در جهت عمود بر پروفیل برداشت تغییرات مقاومت ویژه وجود ندارد. [Loke, 2004].



شکل ۲-۴: روش و توالی اندازه‌گیری برای یک برداشت دوبعدی [Loke and Barker, 2004]

برای رسیدن به یک تصویر دوبعدی مناسب زیر سطحی، پوشش اندازه گیری ها باید به اندازه کافی برقرار باشد. به عنوان مثال، شکل ۲-۴ یک توالی ممکن از اندازه‌گیریها برای آرایه الکترودی ونر برای یک سیستم با بیست الکترود را نشان می‌دهد. در این مثال، فاصله بین الکترودهای مجاور برابر با a است. در مرحله نخست برداشت، تمامی اندازه‌گیری های ممکن با آرایه ونر و با فاصله الکترودی 1a انجام می‌شود. در این مرحله، الکترودهای شماره یک، دو، سه و چهار مورد استفاده قرار می‌گیرند. توجه به این نکته نیز ضروری است که الکترود یک مورد استفاده در این بخش همان

[1] Electrical Imaging

الکترود جریان اول C1، الکترود دو، الکترود پتانسیل اول P1، الکترود سه، الکترود پتانسـیل دوم P2 و الکترود چهار، الکترود جریان دوم C2 است. در مرحله دوم اندازه‌گیری نیز الکترودهای شماره دو، سه، چهار و پنج به ترتیب به عنوان C1، P1، P2 و C2 مورد استفاده قرار مـی‌گیرنـد. در ادامـه ایـن عمـل تکرار شده تا خط برداشت (الکترودهای هفده، هجده، نوزده و بیسـت) بـه انتهـا برسـد [Dahlin and Loke, 1998].

پس از تکمیل اندازه‌گیری‌های با فاصله الکترودی 1a، در مرحله بعد، اندازه‌گیری‌های با فاصله الکترودی 2a انجام می‌شوند و برداشت به همین شکل برای فواصل الکترودی 3a، 4a، 5a و 6a نیز تکرار می‌شود. برای رسیدن به بهترین نتایج اندازه‌گیری‌ها در یک برداشت صحرایی، لازم است این فرایند به شکلی دنبال شود که برای بیشترین فاصله الکترودی نیز تمامی برداشت‌های ممکن انجام شود. این موضوع در بهبود کیفیت مدل تفسیر بدست آمده از مدل‌سازی معکوس داده‌های مقاومت-ویژه ظاهری موثر است [Dahlin and Loke 1998].

۲-۳-۱-۲- انواع آرایه برای برداشت دوبعدی

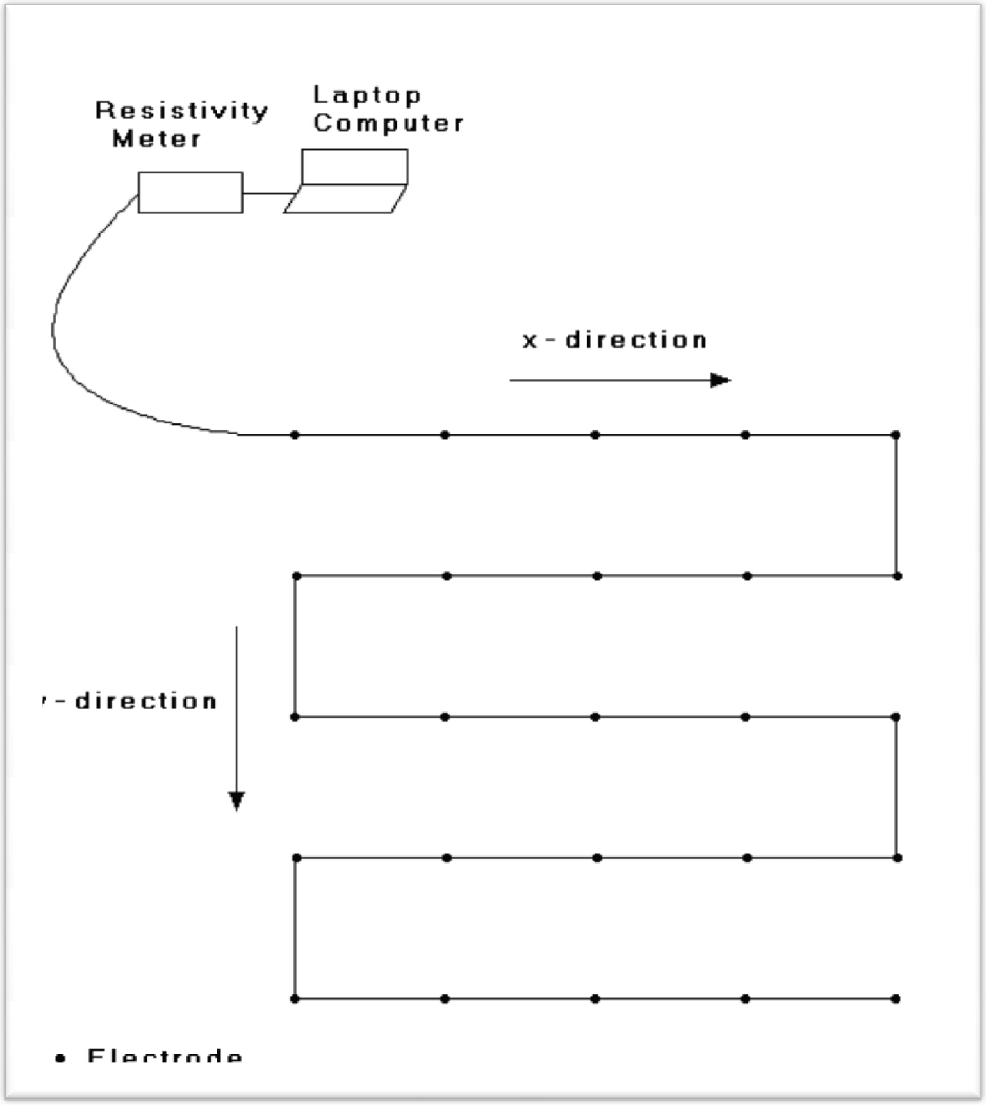
با بررسی‌های صورت گرفته بر روی آرایه‌های مختلف، آرایه ونر یـک انتخـاب مناسـب بـرای برداشت در مناطق همراه با نوفه (به علت قدرت بالای سیگنال در این آرایه) و منـاطقی اسـت کـه در آن قدرت تفکیک قائم بالایی مورد نیاز است. برای مناطقی که قـدرت تفکیـک افقـی خـوب و پوشـش داده مهم است، آرایه دوقطبی-دوقطبی می تواند یک انتخاب مناسب باشد (با فرض ایـن کـه دسـتگاه برداشت بسیار حساس بوده و یک تماس خوب بـین الکترودهـا بـا زمـین برقـرار باشـد). آرایـه ونـر-شلومبرگر در مواردی که قدرت تفکیک قائم و قدرت سیگنال بالایی نیاز اسـت؛ یـک انتخـاب معقـول است. اگر یک سیستم برداشت شامل تعـداد الکتـرود محـدودی باشـد، اسـتفاده از دو برداشـت آرایـه قطبی- دوقطبی در حالتی که یک بار الکترود جریان بی‌نهایت در یک طرف و در برداشت بعـدی ایـن

الکترود در طرف مقابل قرار داشته باشد، می‌تواند یک انتخاب ماندنی شود. در نهایت بـرای برداشـت-های با فواصل الکترودی اندک که یک پوشش افقی خوب نیاز است، آرایه قطبی- قطبی یـک انتخـاب مناسب به شمار می آید[Loke, 2004] .

۲-۳-۱-۳- برداشت‌های سه‌بعدی

از آنجا که در طبیعت تمامی ساختارهای زمـین‌شناسـی سـه‌بعـدی هسـتند؛ یـک برداشـت مقاومت ویژه سه‌بعدی و پس از آن تفسیر سه‌بعدی می‌تواند دقیق‌ترین پاسخ ها را ارائه نماید. در حال حاضر برداشت‌های سه‌بعدی در مراحل نخستین تحقیقاتی است و هزینه اجرای آن در منـاطق وسـیع زیاد است [Loke, 2004].

آرایه‌های قطبی-قطبی، قطبی-دوقطبی و دوقطبی-دوقطبی معمولاً برای برداشت‌های سـه-بعدی نیز مورد استفاده قرار می گیرند. دلایل این انتخاب‌ها پوشش ضعیف‌تر داده در دیگر آرایه‌هـا در نزدیک لبه‌های شبکه برداشت می‌باشد. الکترودها برای براشت‌های سه‌بعدی همان طور کـه در شـکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، معمولاً در یک شبکه مستطیلی با یک فاصـله ثابـت چیـده مـی‌شـوند [Loke, 2004].

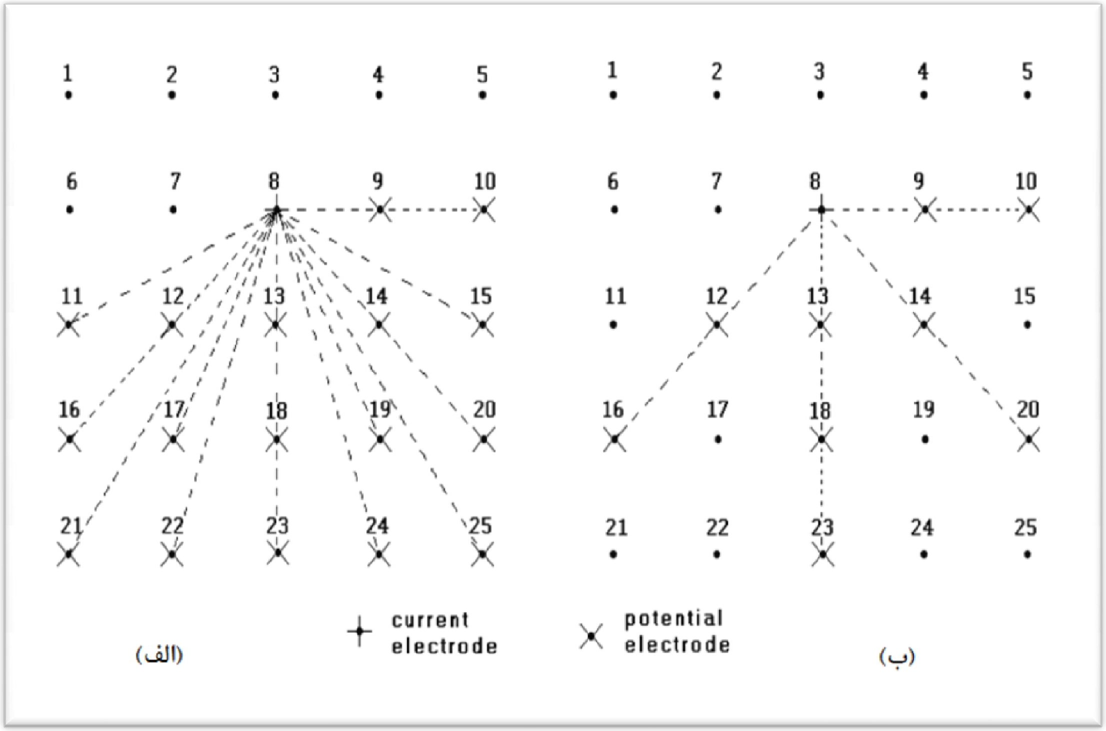


شکل ۲-۵: آرایش الکترودها برای یک برداشت سه‌بعدی [Loke and Barker, 2004]

۲-۳-۱-۴- روش برداشت سه‌بعدی

در اینجا به عنوان یک مثال موردی تنها از آرایه قطبی- قطبی برای بیان یک برداشت سه‌بعدی استفاده شده است. در کامل‌ترین حالت اندازه‌گیری این مثال، در هر نوبت یک الکترود نقش الکترود جریان را ایفا کرده و پتانسیل تمام الکترودهای دیگر اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۲-۶، الف). به دلیل آنکه ممکن است انجام یک تعداد زیادی اندازه‌گیری، به ویژه با یک دستگاه اندازه گیری تک-

کانال معمولی مرسوم مورد استفاده در برداشت‌های دوبعدی، زمان‌بر است؛ برای کاهش تعداد اندازه-گیری‌های مورد نیاز بدون کاهش جدی در کیفیت مدل به دست آمده، یک ترتیب اندازه‌گیری جانشین در شکل زیر نشان داده شده است. در این روش که با نام برداشت قطر تقاطع[1] شناخته می‌شود، اندازه‌گیری های پتانسیل تنها در الکترودهای در جهت x، جهت y و خط قطری ۴۵° عبوری از الکترود جریان انجام می‌گیرد (شکل ۲-۶، ب)[Loke and Barker, 1996b].



شکل ۲-۶: روش‌های برداشت سه‌بعدی الف) برداشت با اندازه‌گیری مجموعه داده کامل و ب) برداشت قطری

[Loke and Barker, 1996b]

در برخی موارد نیز داده‌های سه‌بعدی از تعدادی پروفیل برداشت دوبعدی که به موازات یکدیگر قرار دارند؛ تشکیل می شود. در شرایط ایده‌آل این برداشت ها می‌تواند یک مجموعه خطوط برداشت با اندازه‌گیری‌های در جهت x باشد، که به وسیله مسیرهای دیگری از خطوط در جهت y

[1] Cross-diagonal survey

دنبال می‌شود. در تفسیر سه‌بعدی ، اندازه‌گیری‌های انجام شده عمود بر هم باعث اجتناب از جهت گیری به یک سمت در تفسیر داده‌ها می شود [Loke, 2004] .

۲-۳-۱-۵- بررسی آرایه‌های برداشت سه‌بعدی

برای شبکه‌های نسبتاً کوچک کمتر از۱۲*۱۲ الکترود، آرایه قطبی- قطبی اساساً یک تعداد بیشتر از اندازه‌گیریهای مستقل ممکن در مقایسه با آرایه‌های دیگر دارد. اتلاف نقاط داده نزدیک کناره های شبکه به حداقل می‌رسد و پوشش داده افقی بهتری در مقایسه با آرایه‌های دیگر تامین می‌کند. این آرایه یک آرایه مورد پسند برای شبکه‌های برداشت کوچک با فاصله نسبتاً کوتاه (کمتر از ۵ متر) بین الکترودها می‌باشد. اما، عیب آن تامین دو الکترود دوردست است که باید در یک فاصله مناسب بزرگ از شبکه برداشت قرار داده شوند. به سبب فاصله زیاد بین دو الکترود پتانسیل، این آرایه به نوفه تلوریک حساس‌تراست [Park and Van, 1991]. آرایه قطبی- دوقطبی یک انتخاب جالب برای شبکه‌های سایز متوسط است. این آرایه یک قدرت تفکیک بالاتر از آرایه قطبی- قطبی دارد، زیرا تنها به یک الکترود دوردست نیاز دارد و کمتر به نوفه تلوریک حساس است [Sasaki, 1992] . برای برداشت‌های با شبکه‌های بزرگ، به خصوص هنگامی که موقعیت مناسبی برای الکترود دوردست نباشد، آرایه دوقطبی- دوقطبی می‌تواند استفاده شود.

به طور کلی می‌توان گفت، در برداشت دوبعدی، مقاومت ویژه در جهت قائم همچون جهت افقی در طول خط برداشت تغییر می‌کند [Loke, 2004]. با وجود آن که برداشت سه بعدی را می‌توان برداشت بهتری از لحاظ بررسی تغییرات مقاومت ویژه در جهات مختلف دانست اما برداشت‌های دوبعدی به دلیل سازش اقتصادی بین برداشت‌های ارزان و نتایج بسیار دقیق گرفته شده ، بیشتر عملیاتی می‌گردد. معمولا یک برداشت یک‌بعدی (1-D) شامل ۱۰ تا ۲۰ قرائت می‌شود درحالی که

برداشت‌های تصویرسازی دوبعدی (2-D) در حدود ۱۰۰ تا ۱۰۰۰ اندازه‌گیری را شامل می‌شود. در مقایسه با این دو نوع برداشت، یک برداشت سه‌بعدی ممکن است شامل چندین هزار اندازه‌گیری شود [Loke, 2004].

به دلیل عدم صرفه اقتصادی برداشت‌های سه‌بعدی، این نوع برداشت کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. دو پیشرفت معاصر که می‌تواند برداشت‌های سه‌بعدی را تا حدودی به یک قیمت مناسب‌تر در آینده نزدیک تبدیل کند، یکی توسعه مقاومت ویژه سنج‌های مولتی-کانال[۱] است که قادر به انجام تعداد قرائت بیشتر در یک زمان واحد است. این کار در کاهش زمان قرائت مهم است. پیشرفت دوم میکروکامپیوترهای سریع‌تر است که قادر به معکوس سازی مجموعه‌های داده خیلی زیاد (با بیش از ۸۰۰۰ نقطه داده و شبکه‌های برداشت بزرگتر از ۳۰ در ۳۰) است تا در یک زمان معقول کامل کند [Loke, 2004].

۲-۳-۲- مدل‌سازی[۲]

فرایند مدل‌سازی داده های توموگرافی که از اهمیت بالایی برخوردار است؛ داده‌های خام بدست آمده در مرحله برداشت را به یک نتیجه قابل تفسیر و بررسی تبدیل می‌کند. در این مرحله ضخامت و مقاومت لایه های زیر سطحی تخمین زده می شوند. مدل‌سازی دقیق و صحیح، اعتبار تفسیر را بالا می‌برد. از این رو مدل‌سازی باید با دقت بالایی انجام پذیرد.

در حالت کلی مدل‌سازی می‌تواند به دو صورت انجام گیرد

الف) مدل‌سازی مستقیم[۳] (پیشرو)

---
1 Multy channel
2 Modelling
3 Forward modelling

ب) مدل‌سازی معکوس[1] (وارونه)

که هر یک به اختصار در زیر بیان می‌شوند.

۲-۳-۲-۱- مدل‌سازی پیشرو

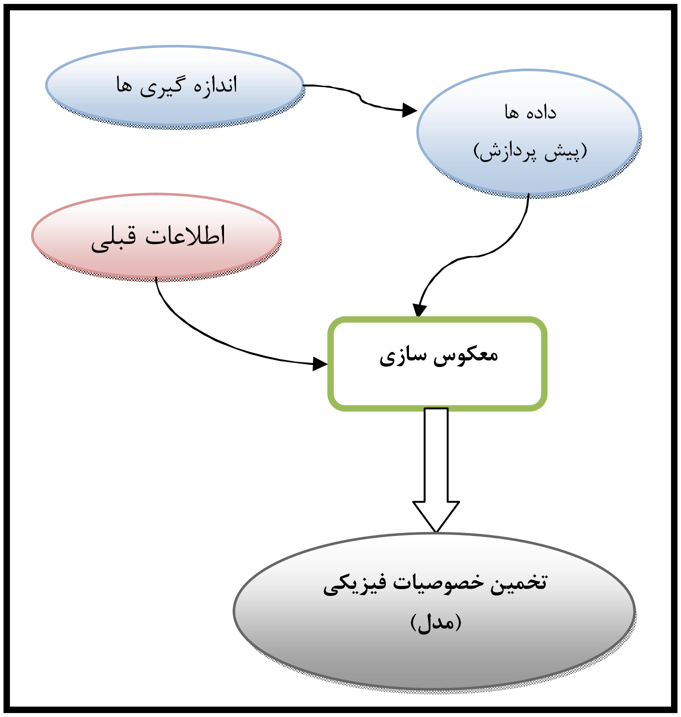
در این نوع مدل‌سازی زمین و پراکندگی مقاومت ویژه در قسمت‌های مختلف آن موجود است و داده‌ها و منحنی‌های مورد نیاز از این مدل زمین به دست می‌آید به عبارت بهتر در این نوع مدل‌سازی از زمین به منحنی مقاومت ویژه رسیده می‌شود. در این روش مدل اولیه به صورت اتفاقی تعیین می شود و کنترل خاصی در انتخاب مدل اولیه وجود ندارد. این روش مدل‌سازی بر مبنای آزمون و خطا[2] با مدل‌های زمینی دو بعدی با استفاده از روش اجزاء محدود یا تفاوتهای محدود صورت می‌پذیرد. مدل اولیه در این نوع از مدل‌سازی سلیقه‌ای می‌باشد و بسته به تبحر و تجربه کارشناس ژئوفیزیک بهبود می یابد [Loke and Barker, 1996a]. از نرم افزارهای ژئوفیزیکی که در آن مدل-سازی پیشرو مورد استفاده دارد، می‌توان به نرم افزار Res2Dmod اشاره نمود.

۲-۳-۲-۲- مدل‌سازی معکوس

در روش معکوس سازی بر خلاف مدل‌سازی مستقیم با استفاده از داده‌های به دست آمده، مدل زمین تخمین زده می‌شود. این مدل‌سازی بنا به دلایل زیادی که در زیر ذکر خواهد شد در بررسی‌های ژئوفیزیکی پرکاربردتر از مدل‌سازی پیشرو می‌باشد [loke and Barker, 1996a]. معکوس سازی یک مجموعه عملیات ریاضی است که به شکل های مختلفی انجام می‌پذیرد. همان طور که در شکل ۲-۷ مشاهده می‌شود برای معکوس سازی باید اندازه گیری‌ها صورت گرفته، داده های لازم از این اندازه گیری‌ها تولید شده، و نیز تعدادی اطلاعات قبلی به عنوان راهنمای مدل‌سازی موجود باشد.

---
[1] Inverse modelling
[2] Trial and error

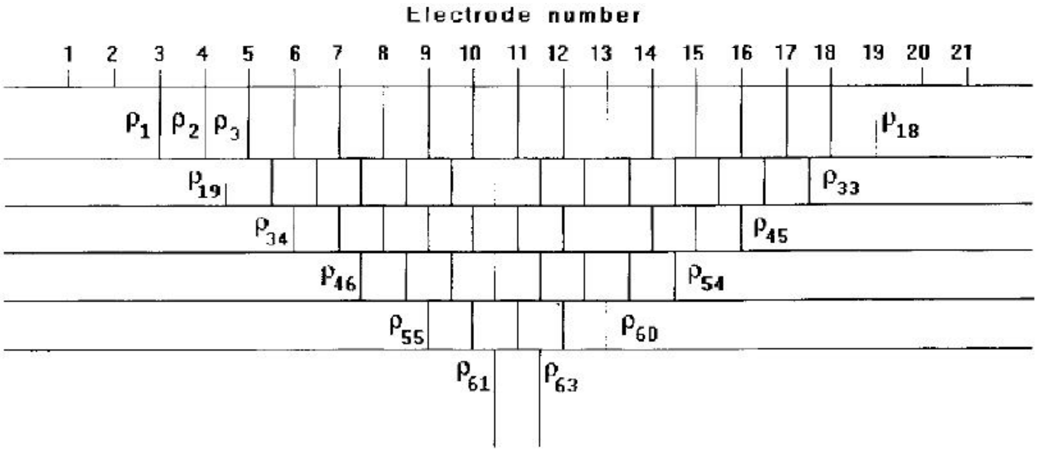
پس از آن معکوس سازی می‌تواند به کمک داده‌های اولیه و اطلاعات قبلی در قالب ورودی انجام پذیرد [UBC.ca, 2007].



شکل ۲-۷: روند تخمین مدل به وسیله معکوس سازی[UBC.ca, 2007]

مراحل معمول در فرآیند معکوس سازی شامل قرائت اولیه داده های مقاومت ویژه، تصحیح پارامترهای معکوس سازی در صورت لزوم و انجام معکوس سازی می باشد. در مدل‌سازی قبل از هر چیز به یک مدل فرضی اولیه برای انجام مدل‌سازی نیاز می‌باشد [Loke and Barker, 1996a]. روش مدل‌سازی معکوس معمولاً از یک تکنیک بهینه سازی غیر خطی برای بهبود بخشیدن به یک مدل ساده اولیه استفاده می کنند [Loke, 2004].

در مدل‌سازی دوبعدی (2D) داده‌های مقاومت ویژه از نرم افزار RES2DINV استفاده می‌شود. در این نرم افزار مدل مورد استفاده به عنوان مدل اولیه شامل یک سری از بلوک‌های مستطیلی دو بعدی می‌باشد که در شکل ۲-۸ نشان داده شده است. در این مدل تعداد بلوک ها با تعداد نقاط داده‌ها در شبه مقطع مقاومت ویژه ظاهری برابر است و به یک شیوه مشابه ارنج شده اند همچنین عمق مراکز بلوک‌ها در عمق میانگین تحت بررسی برای بازه‌های الکترودی مختلف استفاده شده قرار گرفته اند [Loke and Barker, 1996a].



شکل ۲-۸: ترتیب بلوک‌های مستطیلی مورد استفاده در مدل‌سازی سه‌بعدی[Loke and Barker, 1996a]

پس از تخمین مدل اولیه نوبت به تصحیح این مدل با هدف رسیدن به انطباق قابل قبول با داده‌های صحرایی می‌رسد. برای این منظور دو روش مورد استفاده قرار می‌گیرد که عبارتند از روش معمول کمترین مربعات گوس - نیوتن[1] و روش شبه نیوتن[2].

۲-۳-۲-۲-۱- روش کمترین مربعات گوس-نیوتن

[1] Gauss-Newton
[2] Quasi-Newton

در روش گاوس-نیوتن برای بهبود مدل اولیه از رابطه زیر استفاده می‌شود.

$$(J^T J + \lambda i)\Delta q_k = J^T g \qquad (۲-۲)$$

که در رابطه بالا

q: بردار پارامتری مدل شامل لگاریتم مقاومت و ضخامت لایه ها

g: بردار تفاضلی شامل تفاضل لگاریتم مقادیر مقاومت ظاهری اندازه گیری شده و محاسباتی

Δq: تغییر پارامتری مدل

i: ماتریس وجودی

λ: عامل میرایی

J: ماتریس ژاکوبین، می‌باشد.

روش مدلسازی معکوس کمترین مربعات گوس- نیوتن می تواند به سه گام اصلی تقسیم شود. گام اول محاسبه مقادیر مقاومت ویژه ظاهری برای مدل حاضر می باشد. این مرحله در حالت نرمال به وسیله استفاده از روش تفاوت محدود[1] یا روش اجزا محدود[2] انجام می شود. گام دوم محاسبه ماتریس ژاکوبین j مشتقات جزئی می باشد. گام سوم حل سیستم معادلات خطی در معادله ۲-۲ می باشد. این مراحل به صورت تناوب تکرار می‌شوند تا همخوانی مناسب بین مدل ایجاد شده با مدل صحرایی به دست آمده و یا برنامه به حداکثر تکرار تعریف شده خود برسد [Loke and Barker, 1996a].

[1] Finite difference method
[2] Finite element method

از مزایای این روش مدل‌سازی نزدیک بودن مدل ساخته شده به وسیله نرم افزار با مدل زمینی در همان تکرارهای اولیه می‌باشد. اما به دلیل محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، این روش زمان‌بر بوده و نیاز به حافظه زیادی برای مدل‌سازی دارد [Loke and Barker, 1996a].

۲-۳-۲-۲-۲- روش شبه نیوتن

ماتریس ژاکوبین J باید در هر تکرار در روش معمول گاوس نیوتن محاسبه شود [Loke and Barker, 1996a].

روش‌های شبه نیوتن از محاسبه دوباره ماتریس ژاکوبین با استفاده از یک روش به روز رسانی[1] اجتناب می کنند. این روش برای تکرارهای بعدی، ماتریس ژاکوبین را ارزیابی می‌کند. اگر ماتریس ژاکوبین J_0 برای مدل اولیه در اولین تکرار موجود باشد. مشتقات جزئی می تواند بطور تحلیلی با استفاده از یک مدل زمین همگن بعنوان مدل اولیه، محاسبه شوند.

روش شبه نیوتن از معادله به روزرسانی که در زیر آمده است، استفاده می کند

$$B_{i+1} = B_i + u_i p_i^T \quad (۳-۲)$$

که

$$U_i = (\Delta y_i - B_i p_i)/p_i^T p_i \quad (۴-۲)$$

$$\Delta y = y_{i+1} - y_i \quad (۵-۲)$$

در رابطه بالا

[1] updating

y_i: پاسخ مدل برای iامین تکرار

B_{i+1}: تقریب ماتریس ژاکوبین برای (i+1) امین تکرار، با استفاده از تقریب ماتریس ژاکوبین B_i

و P_i: بردار انحراف پارامتر ، می‌باشد.

لازم به ذکر می‌باشد که که تکنیک‌های دیگری نیز برای روش شبه نیوتن وجود دارد اما در این تحقیق تنها به ذکر این مورد بسنده می‌شود.

گامهای اصلی انجام مدل سازی معکوس شبه نیوتنی در ادامه آمده است:

گام اول: در ابتدا برخی پارامترها که فرایند معکوس سازی را هدایت می کنند باید انتخاب شوند. یک عامل میرایی اولیه و یک عامل میرایی کمینه برای روش کمترین مربعات باید معین شود. مقادیر پیش فرض ۰/۲۰ و ۰/۰۴ برای این دو عامل نتایج رضایت بخشی را برای بیشتر سری داده های صحرایی می دهد. همچنین ماکزیمم تعداد تکرارها برای روش مدلسازی شبه نیوتن باید تعیین گردد.

بعضی معیارهای همگرایی مانند یک خطای کمینه RMS error باید مشخص شود. برای داده های صحرایی که سطح دقیق نویز معمولاً ناشناخته است، مناسب‌تر آن است که از تغییر در RMS error استفاده کنیم که این امر به وسیله ضابطه زیر داده می شود.

$$e_i = (\varepsilon_i - \varepsilon_{i+1})/\varepsilon_i \qquad (۲- ۶)$$

که ε_i و ε_{i+1} ، RMS error برای iامین و (i+1) امین تکرار و e_i نیز میزان خطای RMS error کمینه می باشند. بطور نرمال فرایند مدل‌سازی معکوس زمانی که e_i کمتر از ۰/۵٪ است، متوقف می شود.

گام دوم: یک مدل زمین همگن بعنوان مدل اولیه برای اولین تکرار استفاده می شود. لگاریتم مقاومت ویژه این مدل بوسیله میانگین گرفتن از لگاریتم‌های مقادیر مقاومت ویژه ظاهری اندازه گیری شده F_i با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$r_o = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} f_i, \tag{۲-۷}$$

که n تعداد نقاط داده هاست. در این مرحله ماتریس ژاکوبین B_0 محاسبه شده و در حافظه کامپیوتر ذخیره می‌شود. معادله کمترین مربعات نیز برای تعیین بردار انحراف پارامتر P_0 حل می‌شود. یک ارزیابی از مقاومت ویژه بلوک‌ها به وسیله رابطه زیر داده شده است:

$$r_1 = r_0 + p_0 \tag{۲-۸}$$

سپس مقاومت ویژه ظاهری برای مدل جدید با استفاده از روش تفاضل محدود محاسبه می‌شود.

گام سوم: روش به روز رسانی ذکر شده در روش شبه نیوتن برای تقریب ماتریس ژاکوبین B_{i+1} برای تکرار بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. بطور نرمال اگر RMS error در تکرار قبلی کاهش پیدا کرده باشد، عامل میرایی نیز اگر هنوز بزرگتر از λ_m در گام اول باشد، کاهش پیدا می کند. اگر RMS error از تکرار قبلی بزرگتر باشد ، یک جستجوی خطی با استفاده از درون یابی درجه دوم در تلاش برای پیدا کردن اندازه گام بهینه برای بردار انحراف پارامتر P مورد استفاده قرار می‌گیرد. این

مورد معمولاً در یک مدل با یک RMS error کمتر رخ می‌دهد. اگر این روش باز هم کار نکند عامل میرایی افزایش پیدا می کند و بردار P_i دوباره محاسبه می شود.

گام چهارم: بعد از آن که یک مدل جدید به دست آمد، بردار انحراف پارامتر P_{i+1} با استفاده از ماتریس ژاکوبین ارزیابی شده، B_{i+1} محاسبه می شود.

مراحل سوم و چهارم همین طور تکرار می شوند تا اینکه برنامه همگرا شود یا اینکه به یک تعداد ماکزیممی از تکرارها برسیم. یک استراتژی نسبتاً ساده برای تغییر عامل میرایی بعد از هر تکرار در این الگوریتم استفاده شده است [Loke and Barker, 1996a].

به طور کلی به دلیل عدم محاسبه ماتریس ژاکوبین در هر تکرار، روش شبه نیوتن در مقایسه با روش گوس- نیوتن، روشی سریعتر می‌باشد که فضای حافظه کمتری از کامپیوتر را نیز در برمی‌گیرد. این مزایا باعث شده تا در معکوس سازی بیشتر روش شبه نیوتن استفاده شود [Loke and Barker, 1996a].

۲-۳-۳- روش برداشت سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته CVES[1]

روش سونداژزنی الکتریکی قائم پیوسته (CVES) در حقیقت از تعدادی سونداژ الکتریکی تشکیل شده که در یک پروفیل خطی برداشت شده‌اند و در نتیجه می‌توانند به صورت دوبعدی نیز تفسیر شوند [Molano et al, 1990]. در این روش هدف اولیه بررسی زمین به صورت یک بعدی است؛ و برداشت در آن بیشتر با آرایه شلومبرگر انجام می‌شود. با برداشت خطی چندین سونداژ امکان تفسیر دوبعدی میسر خواهد شد. به دلیل حساسیت کم آرایه شلومبرگر به تغییرات جانبی، بهتر است مدل‌سازی به وسیله این آرایه را یک مدل‌سازی ۱/۵ بعدی (1.5D) دانست. از آنجایی که آرایه

[1] Continuous Vertical Electric Sounding

شلومبرگر در نشان دادن تغییرات هموار مقاومت ویژه، قوی‌تر از دیگر آرایه‌ها است، روش برداشت CVES در زمین‌های با تغییرات عمقی هموار نتایجی قابل قبولی ارائه می‌دهد [Muiuane and Pederson, 1999].

۲-۳-۴-برداشت‌های توموگرافی در حوزه زمان

در پاره ای از مطالعات نظیر پایش آلودگی های زیست محیطی، روش توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی در زمان های متعدد انجام می شود که در این صورت به نام روش ALERT[1] نامیده می شود. این روش برای نمایش تغییرات زمانی ویژگی‌های الکتریکی زیر سطحی مورد استفاده قرار می گیرد. با استفاده از روش ALERT می توان در صورت لزوم حتی از دفتر کار اداره مرکزی نیز سایتها و مناطق مورد مطالعه را با به کارگیری تکنولوژی‌های دورسنجی الکترونیکی[2] مانند ماهواره، اینترنت و یا GPRS، کنترل و ترسیم نمود و بدین صورت صرفه جویی هنگفتی در هزینه‌های برداشت‌های الکتریکی که لازم است در فواصل زمانی معین در محل سایت تکرار گردند، انجام می شود. این روش برای نشان دادن موقعیت‌های مشخص زیرزمینی در آینده از نظر زیست محیطی (آلودگی‌های زیرزمینی، جلوگیری از خطرات و صدمات احتمالی ناشی از بلایای طبیعی و غیر طبیعی در سازه های زیرزمینی مانند مخازن زیرزمینی و غیره) و اطلاع از فرآیندهای در حال انجام در محل نیز استفاده می شود [Ogilvy et al , 2008].

شناسایی روند ویژگی‌ها و روند توسعه آلودگی‌ها با استفاده از این روش کاربرد فراوانی دارد. برای این هدف ابتدا با استفاده از تجهیزات ژئوالکتریک و آرایشهای الکترودی معمول، برداشت‌های ژئوالکتریکی در فواصل زمانی معین (هر دو یا سه ماه یا حداکثر شش ماه) در محل یا منطقه مورد

[1] Automated time-Lapse Electrical Resistivity Tomography
[2] wireless telemetry

مطالعه برای برداشت و شناسایی آلودگی (موقعیت، شدت، گسترش، سرعت گسترش و سایر ویژگی-های آلودگی) انجام می‌شود. با استفاده از نرم افزارهای ژئوالکتریکی جهت مدل‌سازی معکوس یا وارونه، مدل‌سازی داده های ژئوالکتریکی به دست آمده، انجام و بدین ترتیب، تصاویر ژئوالکتریکی دوبعدی و سه بعدی از زیر سطح زمین منطقه مورد مطالعه جهت تفسیر، تشخیص و تعیین ویژگیهای آلودگی به دست خواهیم آورد.

۲-۳-۵- کاستی های روش توموگرافی الکتریکی

با وجود تمام مزایا، روش توموگرافی الکتریکی دارای دو نقطه ضعف اصلی می‌باشد. مهم ترین نقطه ضعف در این نوع روش مسئله طولانی بودن برداشت است، به طوری که یک پروفیل تنها با ۲۰ موقعیت الکترودی (با فاصله الکترودی ۱ متر) نیازمند ۵۷ قرائت مجزا می‌باشد تا یک شبه مقطع کامل را به دست آورد. این مشکل در برداشت آرایه‌های بزرگ با بیش از چند صد الکترود و یا اندازه‌گیری های تکرار شونده نمود بیشتری پیدا میکند. این نوع برداشت با تعداد زیاد الکترود تنها با دستگاه های مولتی الکترود امکان پذیر می باشد، که در اینجا باز هم باید زمانی را صرف کاشتن الکترودها در زمین کرد [Loke, 2004].

نقطه ضعف دیگر روش توموگرافی الکتریکی، یکتا نبودن نتیجه تفسیر ما می باشد، که به نوعی اعتماد کار ما را دچار مشکل می کند [Beauvais et al, 2003]. البته مشکل زمان‌بر بودن برداشت در تعدادی روش‌های دیگر ژئوفیزیکی همچون روش‌های لرزه ای نیز مشاهده می شود. مشکل دوم نیز به نوعی در ذات تفسیر تمامی روش‌های ژئوفیزیکی وجود دارد و تنها راه اطمینان ۱۰۰٪ از تفسیر، حفاری و مشاهده عینی می باشد، البته تلفیق روش توموگرافی الکتریکی با روش های دیگر می تواند تا حدود زیادی اطمینان نتیجه گیری را بالا ببرد.

فصل سوم

معرفی و بررسی روش GPR

۳-۱- مقدمه

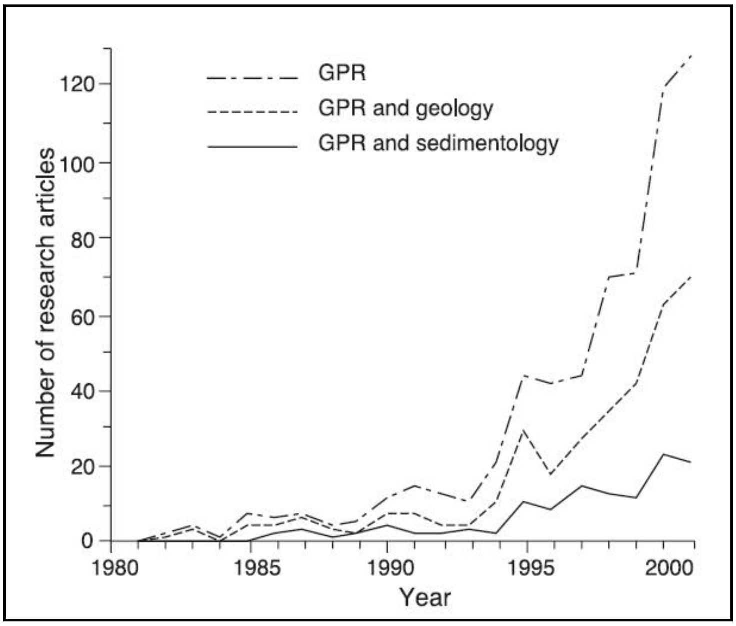
GPR یک تکنیک ژئوفیزیکی پرکاربرد در بررسی ساختارهای زیرسطحی کم عمق و شناسایی تغییرات آن‌ها با استفاده از امواج الکترومغناطیسی می‌باشد [Van Dam and Schlager, 2000]. در این روش به کمک ارسال امواج الکترومغناطیسی و بررسی بازتاب‌های آنها به اکتشافات زیرسطحی پرداخته می‌شود. روش GPR دارای چهار خاصیت در برداشت‌ها می‌باشد: ساده، سریع، غیر مخرب و دقیق [Shafri et al, 2008]. این روش دارای بالاترین قدرت تفکیک در تصویرسازی مواد زیرسطحی[۱]، در حدود چند سانتیمتر در حالات قائم، در مقایسه با هر روش ژئوفیزیکی دیگر می‌باشد. عمق اکتشاف روش GPR از کمتر از ۱ متر تا بیش از ۵۴۰۰ متر (روی ورقه یخ یخچالی)، بسته به خصوصیات مواد، تغییر می‌کند. کاربردهای GPR بسیار گسترده بوده و مقالات و مطالعات مختلفی در حوزه علوم زمین‌شناسی ، زیست‌محیطی ، آب‌شناسی ، یخچال‌شناسی ، باستان‌شناسی ، فعالیت‌های عمرانی و غیره به چاپ رسیده است [Knight, 2001 & Reynolds, 1997].

۳-۲- تاریخچه

رادار (RADAR) مخفف Radio Datection and Ranging است که در سال ۱۹۳۴ اختراع شد. نخستین برداشت رادار در سال ۱۹۲۹ برای تعیین عمق یک رودخانه یخ زده در اتریش انجام گرفت. این روش در حد زیادی تا اواخر دهه ۱۹۵۰ به فراموشی سپرده شد تا اینکه رادارهای نیروی هوایی آمریکا سطوح یخ در قسمتی از سرزمین گرینلند[۲] را مورد بررسی قرار دادند. این کار شروع اکتشافات رادار برای بررسی‌های زیرسطحی بود. در سال ۱۹۶۷ برداشت GPR اولین بار در ماه انجام گرفت. "رکس موری[۳]" و "آرت دریک[۴]" در سال ۱۹۷۲ اولین سیستم‌های تجاری رادار را

---
[1] Subsurface imaging
[2] Greenland
[3] Rex Morey
[4] Art Drake

ساختند. پس از تولید تجاری این دستگاه‌ها یک انفجار در استفاده، مقالات و تحقیقات با موضوع این روش آغاز شد. قدرت تفکیک بالای روش GPR، سرعت برداشت داده‌ها و همچنین غیر مخرب بودن این روش بر توسعه مصرف آن تاثیر حائز اهمیتی دارد [محمدی ویژه، ۱۳۸۷]. شکل ۳-۱ رشد استفاده از این روش را در اواخر دهه ۹۰ به وضوح نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱: تعداد مقاله‌های تحقیقاتی GPR طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ [Neal, 2004]

رادار نفوذی به زمین یا GPR با نام‌هایی چون georadar, ground probing radar, subsurface radar نیز خوانده می‌شود.

۳-۳- تئوری روش GPR

روش GPR یک روش بازتاب پالس الکترومغناطیسی برای بررسی‌های کم عمق با قدرت تفکیک بالا است. این روش مشابه با لرزه نگاری بازتابی می‌باشد که بر مبنای انتشار و بازتاب موج عمل می‌کند [Blindow, ...]. اما در این دو روش طول موج‌ها، قدرت تفکیک و عمق‌های نفوذ به طور معناداری متفاوت با یکدیگر می‌باشند. روش لرزه‌نگاری بازتابی عمق نفوذ بهتری نسبت به روش GPR دارد اما قدرت تفکیک آن پایین‌تر است. همچنین پارامترهای تباین برای روش GPR (امپدانس دی‌الکتریک[1]) با لرزه نگاری بازتابی (امپدانس صوتی[2]) متفاوت است. البته در هر دو روش پردازش‌ها و تقویت‌های مشابهی برای اعمال بر روی داده‌ها وجود دارد.

در یک شکل ساده زمانی این روش، پالس‌های الکترومغناطیسی به داخل زمین ارسال می‌شوند. قسمتی از این انرژی الکترومغناطیسی ارسالی در مرز لایه‌ها یا اشیا (توده‌های) مدفون منعکس و یا پراکنده می‌شود. جهت و دامنه بازتاب‌های بازگشتی به عنوان یک تابع از زمان انتقال ثبت می‌شود [Blindow et al, 2003].

۳-۴- دستگاه GPR

رادار نفوذی به زمین (GPR) قابل مقایسه با رادار مورد استفاده در فرودگاه برای شناسایی هواپیماست. یک سیستم رادار شامل یک تولید کننده سیگنال، آنتن‌های فرستنده و گیرنده و در نهایت یک گیرنده می‌باشد (شکل ۳-۲). گیرنده مورد استفاده در این روش هم ممکن است دارای امکانات ضبط یا نمونه خروجی چاپی بوده و هم ممکن است این امکانات را نداشته باشد.

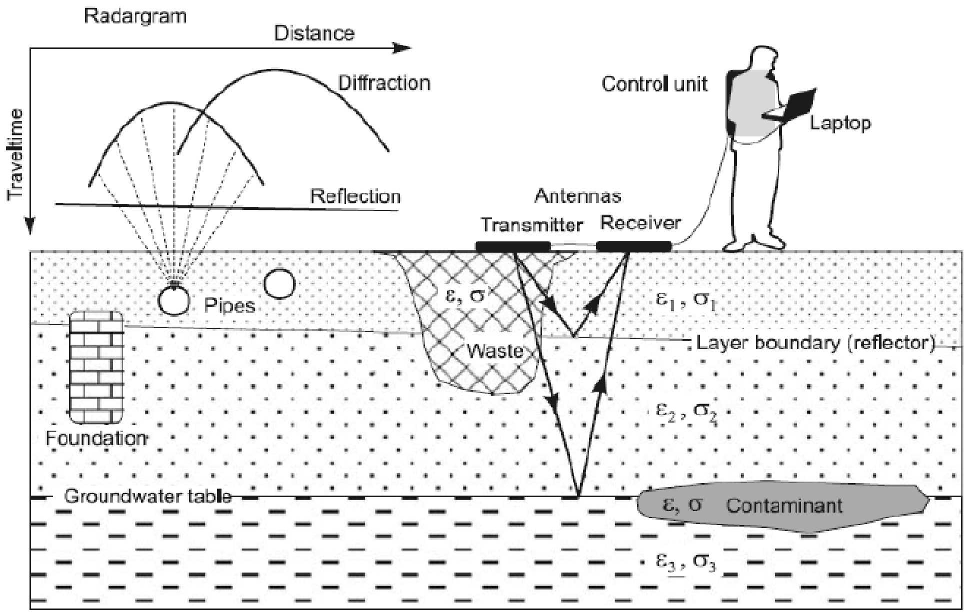
فرستنده یک پالس از امواج الکترومغناطیسی پهن باند در یک فرکانس تعیین شده به وسیله مشخصات آنتن با فرکانس مرکزی ۱۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز و یا حتی بالاتر تولید می‌کند.

---

[1] Dielectric impedance
[2] Acoustic impedance

آنتن فرستنده این امواج را داخل زمین منتشر می‌کند. امواج با سرعت بالایی در زمین منتقل می‌شوند. هنگامی که این امواج به یک شی و یا سطح بازتاب برخورد می‌کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها، قسمتی از امواج به سطح منعکس خواهند شد [Parasnis, 1997]. گیرنده این بازتاب‌ها را به صورت یک پیک بالا نشان می‌دهد و زمان حرکت و دامنه‌های بازتاب را ضبط می‌کند.

در دستگاه‌های GPR فرکانس‌های بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز برای بررسی‌های زمین شناسی و مهندسی استفاده می‌شود. فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰۰ مگاهرتز برای آزمایش مواد و نیز بررسی‌های عمق بسیار کم (در حد چند سانتیمتر) مانند نمایش عمق آسفالت مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل ۳-۲: اجزا دستگاه GPR و اهداف قابل شناسایی آن [Kenodel et al, 2007]

مدت زمانی راکه طول می‌کشد که موج به داخل زمین رفته و از فصل مشترکی منعکس شده و به سمت سطح زمین بازگردد را زمان سیر[1] می‌نامند. دستگاه‌های GPR زمان رسیدن رویدادها را اندازه‌گیری می‌کنند و به این ترتیب بازتاب از توده‌های سطحی بصورت تابعی از زمان نشان داده می‌شوند [Daniels, 1996].

۳-۵- انتشار امواج GPR در زمین

خصوصیات بنیادینی که انتشار موج یا پالس الکترومغناطیس را داخل مواد زیرسطحی کنترل می‌کنند شامل گذردهی دی‌الکتریک[2](ε)، رسانندگی الکتریکی[3](σ) و گذردهی مغناطیسی[4] (μ) هستند [Annan, 2001]. در زیر به بررسی این سه عامل پرداخته شده است.

۳-۵-۱- گذردهی دی‌الکتریک (ε)

گذردهی دی‌الکتریک مهمترین عاملی است که انتشار موج الکترومغناطیس را درون ساختارهای مورد بررسی کنترل می‌کند [Annan, 2001]. سرعت امواج رادیویی در حالت متوسط به سرعت نور در هوا ($c = 0.3$ m/ns) و نسبت ثابت دی الکتریک k بستگی دارد.

$$V_m = c/\sqrt{k} \qquad (۱-۳)$$

در رابطه بالا k، که بعضی اوقات با ε_r نیز نمایش داده می‌شود، ثابت دی الکتریک متوسط می‌باشد و از فرمول $k = \varepsilon/\varepsilon_0$ به دست می‌آید. در این رابطه ε ثابت دی الکتریک متوسط و ε_0 ثابت دی الکتریک خلا می‌باشد که برابر با $8/85\times10^{-12}$ فاراد بر متر است. تباین در ثابت دی الکتریک

---
[1] Two-way travel time
[2] Dielectric permitivity
[3] Electrical coductivity
[4] Magnetic permeability

متوسط (k) بین لایه‌های مجاور باعث ایجاد بازتاب رویداد تابش الکترومغناطیسی می‌شود. تباین بیشتر باعث افزایش میزان انرژی موج رادیویی منعکس شده می‌شود.

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 [Davis and Annan, 1989]. البته این رابطه در اکثر اکتشافات GPR صدق می‌کند.

تحقیقات آزمایشگاهی نشان داده است که مهم‌ترین پارامترهای کنترل کننده جواب دی الکتریک مواد زمین شناسی درصد آب، تخلخل، درصد رس و فرکانس اندازه‌گیری هستند [Knoll and Knight, 1994]. درصد آب موجود در خاک کنترل ابتدایی بر روی ثابت دی‌الکتریک دارد. فاکتورهای دیگری که می‌توانند بر مقدار دی‌الکتریک تاثیر بگذارند شوری خاک و درجه حرارت می‌باشند. شوری هنگامی تاثیر خود را نشان می‌دهد که افزایش میزان آب موجود در سنگ باعث افزایش یون‌های حل شده در آب شود. اثر شوری در فرکانس‌های ۱۰۰۰ مگاهرتز و بالاتر ناچیز است، اما با کاهش فرکانس این اثر افزایش می‌یابد تا جایی که در فرکانس زیر ۲۵ مگاهرتز تاثیر آن شدت بالا می‌رود [Wensink, 1993]. در فرکانس ۱۰۰۰-۱ مگاهرتز اثر دمای آب مایع نیز بر روی میزان دی‌الکتریک ناچیز است، اما در مورد آب یخ زده ثابت دی‌الکتریک از مقدار تقریبی ۸۰ به ۳ افت می‌کند [Davis & Annan, 1989]. ثابت دی‌الکتریک تعدادی از مواد در جدول ۳-۱ آورده شده است.

جدول (۳-۱):مقادیر نوعی ثابت دی الکتریک (K)، سرعت، اتلاف انرژی ورسانندگی برای مواد مختلف زمین در محدوده فرکانس GPR [Davis & Annan, 1989].

ماده	K	سرعت(m/ns)	اتلاف α (dB/m)	رسانندگی σ (mS/m)
هوا	۱	۰/۳۰	۰	۰
آب مقطر	۸۰	۰/۰۳۳	۰/۰۰۲	۰/۰۱
آب شیرین	۸۰	۰/۰۳۳	۰/۱	۰/۵
آب دریا	۸۰	۰/۰۱	۱۰۰۰	۳۰۰۰۰
گرانیت	۴-۶	۰/۱۳	۰/۰۱-۱	۰/۰۱-۱
یخ	۳-۴	۰/۱۶	۰/۰۱	۰/۰۱
سنگ آهک	۴-۸	۰/۱۲	۰/۴-۱	۰/۵-۲
شیل	۵-۱۵	۰/۰۹	۱-۱۰۰	۱-۱۰۰
نمک خشک	۵-۶	۰/۱۳	۰/۰۱-۱	۰/۰۱-۱
سیلت	۵-۳۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰	۱-۱۰۰
رس	۵-۴۰	۰/۰۶	۱-۳۰۰	۲-۱۰۰۰
شن خشک	۳-۵	۰/۱۵	۰/۰۱	۰/۰۱
شن اشباع	۲۰-۳۰	۰/۰۶	۰/۰۳-۰/۳	۰/۰۱-۱

۳-۵-۲- رسانندگی الکتریکی(σ)

هنگامی که امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی انتشار می‌یابند عواملی در کاهش قدرت سیگنال این امواج تأثیر گذارند. از جمله این عوامل می توان به پراکندگی آنها در اثر برخورد با اشیاء، اندازه طول موج GPR، بازتاب 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)[1] می‌باشد [محمدی ویژه، ۱۳۸۷]. رسانندگی الکتریکی به دلیل نقش مهمی که در تضعیف امواج الکترومغناطیسی دارند، در بررسی‌های روش GPR اهمیت بالایی دارند.

مهمترین عوامل تأثیرگذار بر رسانایی مواد زمینی محتوای آب و غلظت یونی است. اما عوامل دیگر مانند دما، فشار، دامنه و فرکانس میدان الکتریکی نیز بر روی آن تأثیر دارند. ولی این عوامل فقط زمانی که استفاده پیشرفته از GPR مدنظر باشد در نظر گرفته می‌شوند [Neal, 2003].

[1] Attenuation

۳-۵-۳- گذردهی مغناطیسی (μ)

گذردهی یا تراوایی مغناطیسی مشابه با گذردهی دی‌الکتریک به صورت نسبی بیان می‌شود.

$$\mu = \mu_0(1 + K) \qquad (۳-۲)$$

در رابطه بالا K خودپذیری مغناطیسی[1] است و μ_0 تراوایی مغناطیسی خلأ بوده و برابر با $4\pi \times 10^{-7}$ H/m است. تراوایی مغناطیسی نسبی به صورت زیر بیان می‌شود [Annan, 2001]:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}(1 + K) \qquad (۳-۳)$$

تجربیات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که در فرکانس‌های مورد استفاده در GPR، اتلاف انرژی مغناطیسی در ارتباط با ماسه‌های غنی از آهن طبیعی (کانی‌های اکسید آهن) صورت می‌گیرد و به ندرت در برداشت‌های صحرایی جز عوامل تاثیر گذار می‌باشد [مزینانی، ۱۳۸۹].

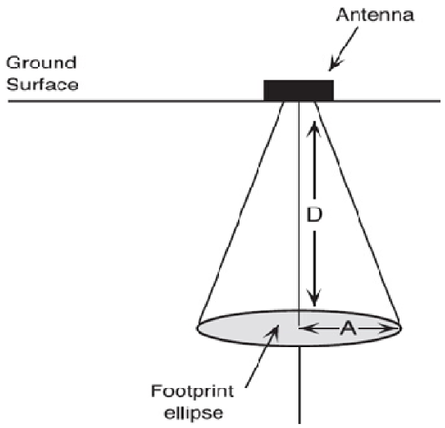
۳-۶- خواص امواج GPR

۳-۶-۱- انتشار

با فرض نقطه‌ای بودن منبع ارسال موج (آنتن فرستنده) می‌توان فرض کرد که ، انتشار انرژی (امواج) از آنتن فرستنده به شکل یک مخروط بیضوی است. به سطح مقطع این مخروط که به شکل بیضی است ردپا[2] گفته می‌شود [Neal, 2003] . شکل ۳-۳ شکل موج ارسالی و ردپای آن را

[1] Magnetic suscebtibility
[2] Footprint

نمایش می‌دهد. اندازه این سطح یا ردپای رادار بستگی به عواملی چون طول موج (λ)، عمق بازتاب کننده (Z) و ثابت دی‌الکتریک (K) موادی که سیگنال از آن عبور می‌کند دارد [Howe, 2000].



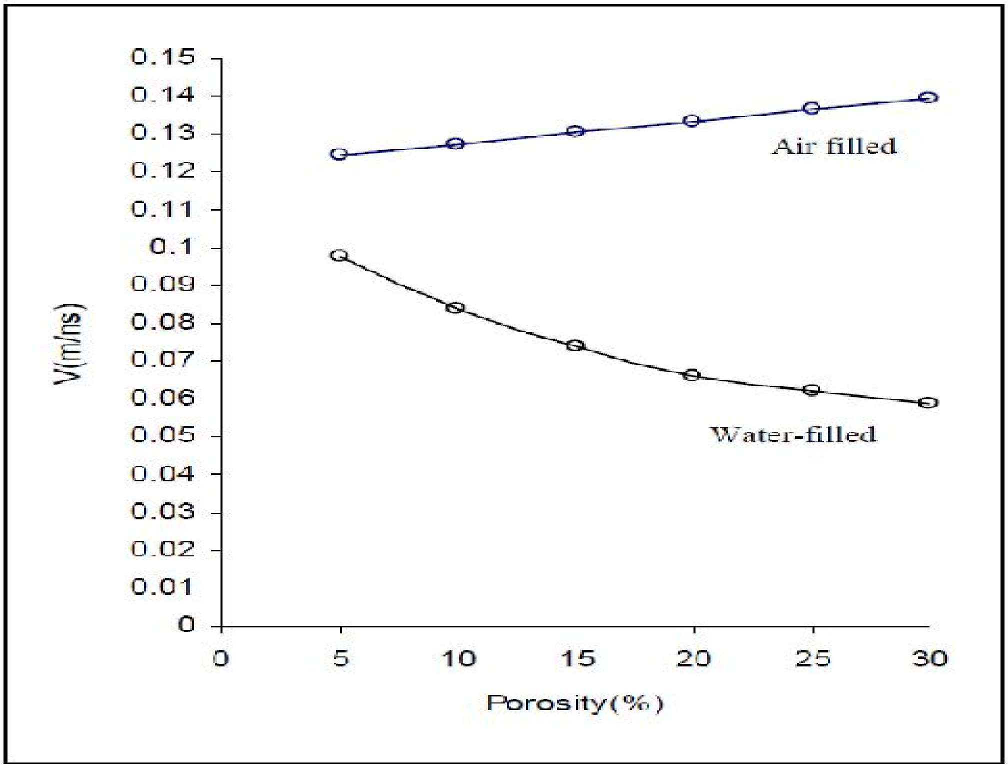
شکل ۳-۳: ردپای موج GPR

۳-۶-۲- سرعت

از رابطه ۳-۱ می‌توان دریافت که ثابت دی‌الکتریک لایه‌های زیرسطحی بیشترین تاثیر را در سرعت امواج الکترومغناطیسی دارا می‌باشند و با توجه به رابطه معکوس بین ثابت دی الکتریک و سرعت، با کاهش ثابت دی‌الکتریک نسبی سرعت سیر موج افزایش می‌یابد. به عنوان مثال بر طبق جدول ۳-۱ یخ با ثابت دی‌الکتریک نسبی پایین، سرعت بالای عبور امواج را از خود نشان می‌دهد.

باید گفت که سرعت علاوه بر ثابت دی‌الکتریک با فرکانس و طول موج ارسالی نیز رابطه مستقیمی دارد. سرعت تا حدود بسیار کمی در برداشت‌ها به نفوذپذیری و اتلاف نیز وابسته می‌باشد [Parasnis, 1997].

شکل ۳-۴ رابطه بین سرعت موج رادیویی و حجم حفرات پر شده با هوا و آب را نشان می‌دهد. می‌توان مشاهده کرد که سرعت امواج رادیویی با افزایش درصد رطوبت خاک کاهش می‌یابد (این اتفاق نشان از افزایش ثابت دی الکتریک داد). به واسطه سرعت پایین‌تر، مواد مرطوب قدرت تفکیک بالاتری در مقایسه با مواد خشک دارا می‌باشند، البته به دلیل آنکه تضعیف در مواد مرطوب بیشتر از مواد خشک می‌باشد، عمق نفوذ در این مواد کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۴: نسبت سرعت‌های رادار و حفرات [After Reynolds, 1997]

۳-۶-۳- کاهش قدرت سیگنال

یکی از مشکلات اساسی در عمق نفوذ امواج GPR تحلیل رفتن سیگنال ارسالی می‌باشد. از عوامل این تحلیل رفتن می‌توان به اتلاف انرژی به صورت گرما و پخش هندسی و نیز کاهش انرژی

امواج در اثر برخورد با سطوح اشاره کرد. در حالت کلی عامل اصلی کاهش قدرت سیگنال پدیده اتلاف می‌باشد که به دلیل خاصیت رسانندگی الکتریکی مواد زیرسطحی نتیجه می‌شود. با توجه به این موضوع با افزایش میزان رسانندگی زیرسطحی اتلاف افزایش یافته و در نتیجه عمق نفوذ نیز کاهش می‌یابد. افزایش میزان رطوبت خاک و یا میزان رس باعث بالارفتن زیاد اتلاف می‌شود. اتلاف علاوه بر رسانندگی زیر سطحی با فرکانس نیز رابطه مستقیم دارد. به این ترتیب که فرکانس‌های بالاتر نسبت به فرکانس‌های پایین‌تر سریعتر انرژی خود را از دست داده و تا عمق کمتری را مورد بررسی قرار می‌دهند [Davis and Annan, 1989].

۳-۶-۴- بازتاب و انکسار

امواج GPR در برخورد با سطوح ناپیوستگی به دلیل اختلاف امپدانس دو محیط بازتاب و انکسار می‌یابند. بخشی از انرژی موج بازتاب شده و بخش دیگر از این فصل مشترک عبور کرده و در محیط دوم نفوذ می‌کنند [حسینی، ۱۳۸۸]. بازتاب امواج به سبب تغییر در گذر دهی نسبی در فصل مشترک دو محیط باعث آشکارسازی فصل مشترک مذبور خواهد شد. تغییر در نوع مایع محتوی سازند، تغییرات کوچک در تخلخل، تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت‌گیری و چینش[۱] آن‌ها ، تماماً بازتاب‌های خوبی را باعث می‌شوند. در نتیجه پدیده‌هایی نظیر سطح ایستابی، ساختارهای رسوبی و مرز بین واحدهای سنگی، بایستی بخوبی توسط روش رادار قابل آشکار سازی باشد [عشقی، ۱۳۸۹].

وقتی امواج الکترومغناطیس به صورت عمود بر این سطوح بازتاب بتابند، خواهیم داشت:

[۱] Packing

$$R = \frac{\sqrt{K_1}-\sqrt{K_2}}{\sqrt{K_1}+\sqrt{K_2}} \qquad (۴-۳)$$

$$T = \frac{2K_2}{K_2+K_1} \qquad (۵-۳)$$

در رابطه بالا R ضریب بازتاب، T نیز ضریب انکسار و همچنین K_1 و K_2 نیز به ترتیب ثابت دی‌الکتریک نسبی برای محیط‌های ۱ و ۲ می‌باشند.

علامت R وابسته به مقادیر K_1 , K_2 می باشد اگر موج از محیطی با ضریب دی‌الکتریک کم وارد محیطی با ضریب دی‌الکتریک بالا شود R منفی می‌شود و برعکس [Howe, 2000]. بر طبق رابطه بالا هرچقدر اختلاف ثابت دی‌الکتریک بین دو محیط بیشتر باشد، میزان بازتاب بیشتر شده و شناسایی مرز توسط دستگاه آسان‌تر می‌گردد. در جدول ۳-۲ گذردهی نسبی چند محیط مختلف با ضرایب بازتاب آنها نشان داده شده است. لازم به ذکر است که علامت منفی به دلیل عبور موج از محیط با سرعت الکترومغناطیسی بالا به محیط کم سرعت حاصل شده است.

جدول ۳-۲: گذردهی نسبی محیط‌های مختلف به همراه ضرایب بازتاب [Zeng and McMechan, 1997]

فصل مشترک			ضریب بازتاب
هوا-خاک خشک	۱	۴	-۰/۳۴
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

۳-۶-۵- منطقه گذار

از عوامل مهم وضوح ناپیوستگی‌ها، پهنای منطقه گذار است. منطقه گذار، منطقه‌ای است که در آن گذردهی دی‌الکتریک تغییر می‌کند[Neal, 2004]. هر چه پهنای این منطقه کمتر و تغییر در گذردهی دی‌الکتریک تند و ناگهانی‌تر باشد ، بازتاب امواج رادار شدت بیشتری خواهد داشت و این فصل مشترک راحت‌تر آشکارسازی می‌شود. در صورتی‌که اگر پهنای این منطقه نسبت به طول موج غالب رادار بزرگ باشد، این فصل مشترک به خوبی آشکارسازی نمی‌شود و بیشتر انرژی سیگنال در این منطقه تلف می‌شود. به عنوان نمونه‌ای از مرزهای تدریجی می توان به سطح ایستابی اشاره کرد که وجود زون موئینه در بالای این سطح باعث این پدیده می‌شود. در این منطقه مرز بین محدوده خشک و اشباع به صورت تدریجی تغییر می‌کند. بسته به جنس سازند و دانه‌بندی سازند پهنای این منطقه می‌تواند متفاوت باشد و همانگونه که در شکل می‌بینیم در رسوبات دانه ریز مانند رس‌ها و سیلت‌ها این منطقه دارای پهنای بیشتری است. از این رو اکتشاف سطح ایستابی معمولاً توسط آنتن-های فرکانس پایین (طول موج بالا) ، انجام می‌شود [عشقی، ۱۳۸۹].

۳-۶-۶- عمق نفوذ

عمق نفوذ در حالت کلی حداکثر عمقی می‌باشد که بتوان داده‌ها را به آن عمق نسبت داد. عمق نفوذ پالس به وسیله فرکانس مرکزی GPR، رسانایی الکتریکی و گذردهی مواد زیرسطحی کنترل می‌شود و به‌طورکلی فرکانس مرکزی بالای آنتن و رسانندگی مواد زیر سطح زمین موجب کاهش عمق نفوذ پالس‌های GPR می‌شوند [Reynolds, 1997].

عمق پوسته[1] معیاری برای نفوذ امواج الکترومغناطیسی درون زمین است. این پارامتر عبارت است از عمقی که دامنه تا $\frac{1}{e}$ از مقدار اولیه خود در سطح زمین کاهش می‌یابد. عمق پوسته (δ) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\delta \approx 5.31\frac{\sqrt{\varepsilon_r}}{\sigma} \qquad (۳- ۶)$$

که σ رسانندگی با واحد mS/meter می‌باشد. این معادله یک تساوی تقریبی برای مواد غیر مغناطیسی است. به عنوان مثال عمق پوسته برای آب دریا تنها ۱ سانتیمتر و برای رس مرطوب تنها ۰/۳ متر می‌باشد [Reynolds, 1997].

روش GPR در مواد عایق مانند ماسه سنگ خشک و گراول و یا یخ تا عمق بالایی (حتی تا حدود ۱۲۰ فوت) نفوذ می‌کنند. این امواج در رسانندهها مثل فلزات نفوذ نمی‌کنند. امواج GPR به میزان زیادی به وسیله رساننده‌هایی مثل رس و آب شور (مثل آب دریا) تضعیف می‌شوند تا جایی که عمق نفوذ موثری نداشته باشند. اما عمق نفوذ این روش در حفرات هوایی بر خلاف روش‌های صوتی و غیر صوتی بالا خواهد بود، که نشان از کامل‌تر بودن این روش در چنین محل‌هایی دارد.

در رابطه با فرکانس ارسالی امواج، تحقیقات نشان می‌دهد که عمق نفوذ برای فرکانس ۴۰ تا ۵۰ مگاهرتز ۳۰ تا ۴۰ متر، فرکانس ۱۰۰ مگاهرتزی ۱۰ تا ۲۵ متر، فرکانس ۲۰۰ مگاهرتزی ۵ تا ۱۵ متر و برای فرکانس ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتزی فقط چند متر است [Smith and Jol, 1995].

---

[1] Skin depth

۳-۶-۷- قدرت تفکیک

قدرت تفکیک، توانایی تفکیک دو پدیده نزدیک به هم می‌باشد و در مورد روش GPR در دو نوع قدرت تفکیک قائم (عمودی) و قدرت تفکیک افقی (جانبی) قابل بررسی است [Kearey and Brooks, 1991]

به عنوان یک قانون کلی تفکیک پذیری عمودی از نظر علمی برابر است با یک چهارم طول موج (طول موج: $\lambda = \frac{V}{f}$). که در این رابطه V سرعت موج رادار در محیط و f فرکانس آن می‌باشند. ولی به طور عملی و برای پرهیز از اشتباهات این مقدار را بزرگتر در نظر می‌گیرند [حسینی، ۱۳۸۸].

تفکیک پذیری عمودی با فرکانس مرکزی آنتن‌ها نیز رابطه مستقیم دارد و با افزایش فرکانس تفکیک پذیری عمودی افزایش یافته است [Moller, 2006]. در جدول ۳-۳ تاثیر فرکانس مرکزی ارسالی بر روی قدرت تفکیک و عمق نفوذ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۳: تاثیر فرکانس بر روی عمق نفوذ و قدرت تفکیک

قدرت تفکیک	عمق نفوذ	آنتن
بالا	0-2 m	500-1000 MHz
متوسط - بالا	0-10 m	100-500 MHz
پایین	0-30 m	20-100 MHz

تفکیک پذیری افقی نیز بیشتر از آنکه تحت تاثیر طول موج باشد، به گسترش موج الکترومغناطیسی وابسته است. همان طور که ذکر شد موج الکترومغناطیسی به صورت یک مخروط در

عمق زمین منتشر می‌شود. هر چه این موج به عمق بیشتری برود، سطح مقطع بیضوی این مخروط گسترش بیشتری پیدا می‌کند. در زیرسطح اگر گسترش جانبی بازتاب کننده‌ای بزرگتر از سطح مقطع این مخروط 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 در مقطع زمانی مشکل است. با توجه به نکته ذکر شده قدرت تفکیک در عمق‌های کم بیشتر از عمق‌های زیاد می‌باشد. از آنجایی که آنتن‌های با فرکانس بالا نیز بیشتر عمق‌های کم را پوشش می‌دهند، این آنتن‌ها قدرت تفکیک جانبی ، مشابه با قدرت تفکیک قائم، بالاتری در مقایسه با آنتن‌های فرکانس پایین دارند [Neal, 2004].

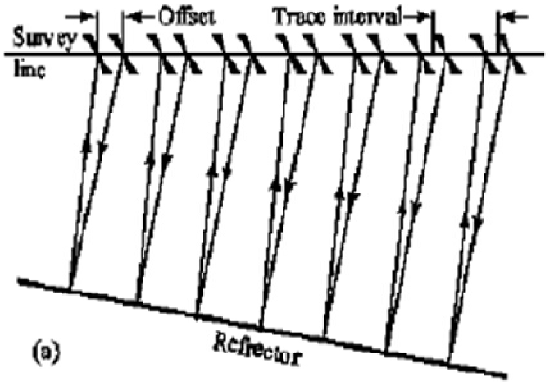
۳-۷- روش‌های برداشت داده های GPR

روش‌های برداشت زمینی به سه نوع تقسیم می‌شوند که در زیر به طور مختصر توضیح داده شده‌اند

۳-۷-۱- پروفیل‌زنی بازتابی[1] یا دور افت مشترک[2]

این روش جزو معمول‌ترین روش‌های مورد استفاده در GPR است که در ان آنتن‌های فرستنده و گیرنده با فاصله ثابت در طول پروفیل برداشت حرکت داده می‌شوند و هم زمان برداشت داده صورت می‌گیرد. در شکل ۳-۵ نحوه برداشت داده‌ها با روش دور افت مشترک نشان داده شده است [Annan, 2001].

[1] Reflection profiling
[2] Common offset



شکل ۳-۵: روش پروفیل زنی[Annan, 2001]

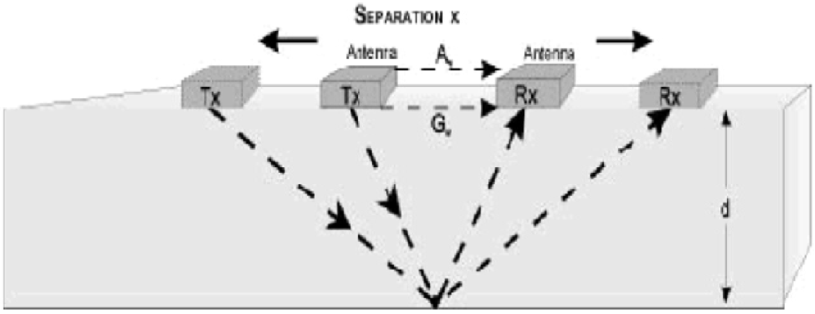
در واقع روش پروفیل زنی می تواند به سرعت داده‌ها را جمع‌آوری کرده و بعنوان یک پروفیل دوبعدی که می‌تواند بازتاب کننده‌های خطی و نقطه‌ای را از هم جدا کند، نمایش دهد.

۳-۷-۲- برداشت‌های CMP/WARR

برخلاف روش پروفیل زنی بازتابی در روش‌های نقطه میانی مشترک (CMP) و بازتاب و شکست زاویه باز(WARR) فاصله بین آنتن‌های فرستنده و گیرنده ثابت نیست. در روش CMP آنتن-های فرستنده و گیرنده در دو طرف یک نقطه ثابت حرکت داده شده و از یکدیگر دور می‌شوند (شکل ۳-۶) [Annan, 2001].

پس از انجام برداشت با این روش ، منحنی زمان سیر امواج بازتابی در زمین در برابر فاصله بین آنتن‌ها ترسیم می‌شود. منحنی به دست آمده یک هذلولی می‌باشد. حال در روش CMP تفسیر مقدماتی به روش T^2-X^2 صورت می‌گیرد (T زمان سیر موج و X فاصله بین آنتن‌ها می باشد). در این روش مربع زمان سیر در مقابل مربع فاصله بین آنتن‌ها به‌صورت یک رابطه خطی است. از روی شیب

این خط، مقدار سرعت موج رادار و از روی زمان تقاطع، عمق جسم بازتاب کننده را می‌توان تخمین زد [Annan,2001] .

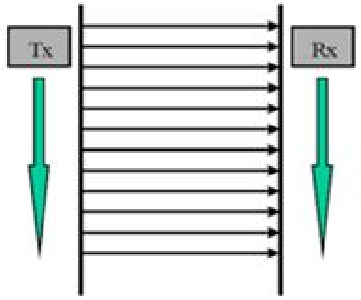


شکل ۳-۶: روش CMP [Annan, 2001]

روش WARR نیز مشابه با روش CMP است. با این تفاوت که در روش WARR یک آنتن ثابت و آنتن دیگر حرکت داده می‌شود [Annan, 2001].

۳-۷-۳- روش Transillumination

استفاده از این نوع آرایش به دلیل نیاز به پردازش‌های با دامنه گسترده و شرایط خاص عملیات، معمول نمی‌باشد. در این روش آنتن‌های فرستنده و گیرنده در دو طرف ساختار قرار می‌گیرند تا خصوصیاتی مانند سرعت و تضعیف را اندازه‌گیری کنند. . با توجه به مشخص بودن فاصله آنتن‌ها، سرعت موج در محیط محاسبه شده و از روی دامنه موج ورودی و دوره پالس GPR، اتلاف و پخش امواج در محیط محاسبه می‌گردد. در نهایت برای تبدیل این مقادیر به پارامترهای مورد نظر و تهیه توموگرام‌ها، پردازش‌های گسترده‌ای روی داده‌ها صورت می‌پذیرد [Reyolds, 1997]. شکل ۳-۷ پردازش با این روش را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۷: روش Transillumination [How, 2000]

۳-۸- پردازش داده‌ها

در حقیقت داده‌های به دست آمده از یک برداشت، داده‌های خام می‌باشند. برای آنکه بتوان به وسیله این داده‌ها یک تفسیر دقیق و صحیح انجام داد، می‌بایست بر روی آنها پردازش‌های مناسبی را اعمال کرد. در این بخش تنها به ذکر پردازش‌هایی که بر داده‌های این تحقیق اعمال گردیده است، می‌پردازیم

۳-۸-۱- تصحیح صفر زمانی

اولین موج ورودی به گیرنده در حقیقت موج مستقیمی می‌باشد که از فرستنده ارسال شده است. در حالت عادی دستگاه به صورت اتوماتیک این نکته را در نمایش داده‌ها لحاظ می‌کند. حال اگر به دلایلی مانند سردتر یا گرم‌تر بودن شدید محیط و یا آسیب دیدگی سیم‌ها این میزان تصحیح دقیق نباشد، پیوستگی ناشی از اهداف زیرسطحی از بین رفته و تفسیر داده‌ها با مشکلاتی رو به رو می‌شود. تصحیح صفر زمانی بر روی تمام رد[1]ها در طول پروفیل اعمال می‌شود [Sernsor & Software, 1999].

---
[1] trace

۳-۸-۲- تصحیح اشباع سیگنال[1]

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 از سیگنال اشباع می‌شود [Annan, 2004]. به عبارت بهتر این جریانات، بازتاب‌های با فرکانس بالا را می‌پوشانند یا اصطلاحاً باعث ایجاد WOW روی فرکانس‌های اصلی می‌شوند. فرایند حذف فرکانس‌های پایین از روی داده‌ها و حفظ سیگنال‌های اصلی به DEWOW معروف است [Annan, 2004].

۳-۸-۳- بهره[2]ها

توان سیگنال بنا به دلایلی مانند اتلاف با افزایش عمق نفوذ به طور تساعدی کاهش می‌یابد. از این رو پاسخ دریافتی از توده‌های عمیق، ضعیف‌تر می‌باشد. برای رفع این مشکل از بهره‌ها که توابعی متغیر با زمان می‌باشند، بر روی داده‌ها استفاده می‌شود. هدف از پردازش بهره، تقویت سیگنال‌های ضعیفی است که از اعماق بیشتر می‌آیند. بهره‌ها انواع مختلفی دارند. بعضی از این بهره‌ها ضریب ثابتی را به تمام داده‌ها اعمال می‌کنند و برخی دیگر بر روی داده‌های عمق‌های مختلف ضرایب متفاوتی را اعمال می‌کنند [Sernsor & Software, 1999].

۳-۸-۳-۱- کنترل بهره اتوماتیک (AGC[3])

این بهره تلاش می‌کند تا تمام سیگنال‌ها را با استفاده از یک تقویت که به طور معکوس متناسب با قدرت سیگنال است، برابر کند. این نوع از تقویت دارای بهترین مزیت برای تعیین

[1] Signal saturation
[2] Gain
[3] Automatic Gain Control

پیوستگی حوادث بازتابی است. در نتیجه در بررسی‌های رسوب شناسی که در آن به نقشه درآوردن تمام فصل مشترک‌های رسوبی حائز اهمیت است، از این فیلتر استفاده فراوانی می‌شود.

۳-۸-۳-۲- بهره گسترش و جبران نمایی (SEC[1])

کاربر باید درک کند که فیلتر AGC اطلاعات دامنه نسبی را حفظ نمی‌کند. در نتیجه در مواردی که به این اطلاعات نیاز می‌باشد از انواع مختلف دیگر بهره‌ها نظیر بهره گسترش و جبران نمایی (SEC) استفاده می‌شود.

هدف از این بهره جبران افت انرژی ناشی از گسترش کروی موج در محیط و اتلاف نمائی انرژی ناشی از رسانایی است. پالس‌های رادار بطور نمائی تضعیف می‌شوند و SEC نیز یک بهره نمائی است. برخلاف AGC در این بهره می‌توان دامنه یا شدت سیگنال‌ها را به‌طور نسبی با یکدیگر مقایسه کرد.

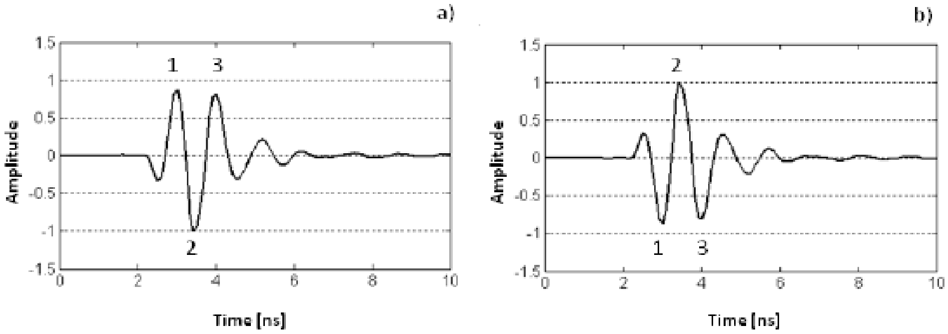
۳-۸-۳-۳- دیگر بهره‌ها

علاوه بر دو بهره AGC و SEC چند بهره دیگر وجود دارد که مختصرا توضیح داده می‌شوند. یکی از این بهره‌ها، تقویت ثابت[2] می‌شد که در آن توسط کاربر بر روی تمام داده‌ها ضریب ثابتی اعمال می‌شود. بهره دیگر تقویت اتوماتیک[3] است. این بهره یک تابع مناسب تقویت را برای مجموعه داده ورودی محاسبه و تامین می‌کند. این تابع با محاسبه کاهش قدرت سیگنال متوسط در زمان به دست می‌آید.

---
[1] Spreading & Exponential Compensating
[2] Constant
[3] Autogain

۳-۸-۳-۴- مشخصه پوشش منحنی[1]

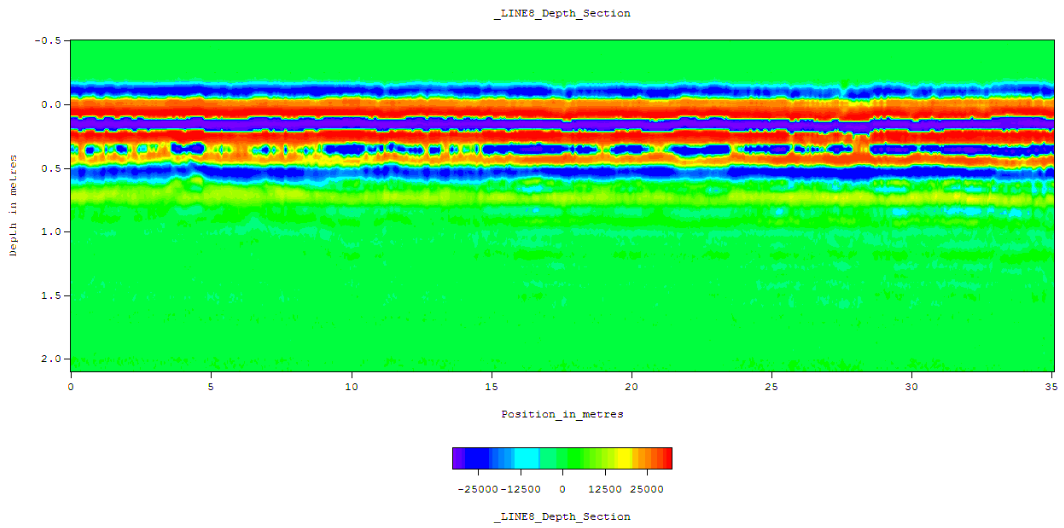
شکل پالس GPR در شکل۳-۸ نشان داده شده است. هر پالس شامل امواج سینوسی و کسینوسی می‌باشد که در آن دو پیک کوچک در اطراف و یک پیک بزرگتر در وسط این دو پیک کوچک قرار دارد. جهت پیک بزرگتر مرکزی نوع پالس را تعیین می‌کند به طوری که شکل سمت راست یک پالس مثبت و شکل سمت چپ یک پالس منفی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸: پالس‌های ارسالی GPR

در صورت بازتاب این پالس‌ها به گیرنده، هر مرز مشترک نیز با دو مولفه مثبت و منفی نمایش داده می‌شود. شکل ۳-۹ داده‌های یک برداشت عملی را نشان می‌دهد. همان طور که در مقیاس پایین شکل نیز دیده می‌شود امواج دارای مولفه مثبت و منفی می‌باشند. در اینجا تعیین مرز لایه‌ها کار بسیار دشوار می‌باشد.

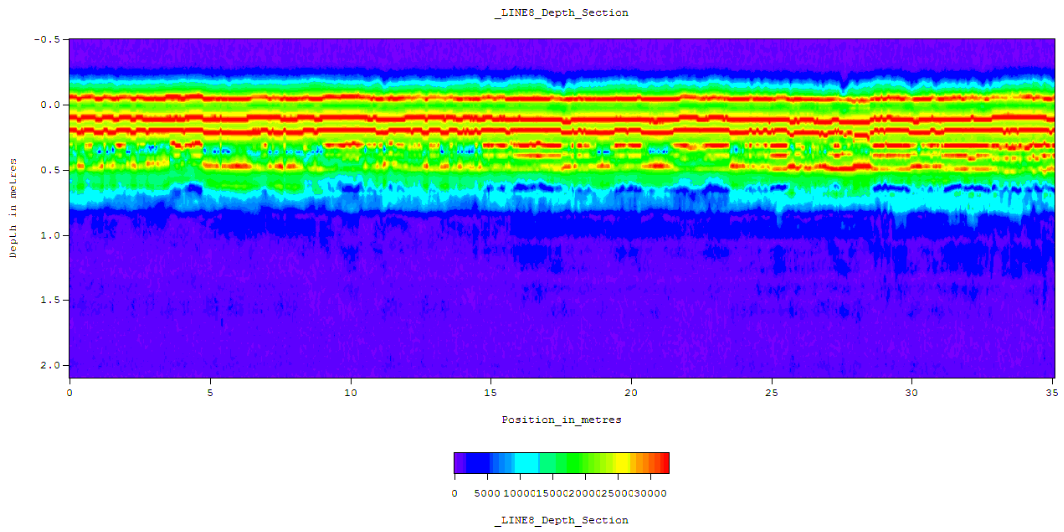
[1] envelope



شکل ۳-۹: مقطع یک برداشت صحرایی بدون اعمال پردازش envelope

برای تفسیر کمی داده‌های GPR و تعیین ضخامت و مرز لایه‌ها، از مشخصه پوشش منحنی یا به عبارت ساده‌تر envelope استفاده می‌شود. این مشخصه یک پالس دارای هر دو مولفه مثبت و منفی را به یک پالس با مولفه مثبت تبدیل می‌کند. در حقیقت این پردازش ماهیت نوسانی امواج رادار را از بین می‌برد و داده‌ها را در قدرت تفکیک واقعی خود نمایش می‌دهد.

شکل ۳-۱۰ مقطع رادار شکل ۳-۹ را پس از اعمال پردازش envelope نمایش می‌دهد. در مقیاس پایین شکل از بین رفتن مولفه‌های منفی قابل تشخیص است. در این شکل مرز لایه‌بندی‌ها به وضوح مشخص شده است.



شکل ۳-۱۰: مقطع یک برداشت صحرایی پس از اعمال پردازش envelope

۳-۹- تفسیر

به طور کلی تفسیر داده‌های GPR را می‌توان به دوبخش عمده، تفسیر کمی و تفسیر کیفی، تقسیم‌بندی کرد.

تفسیر کیفی حالت ساده تفسیر می‌باشد که بیشتر حالت مقایسه‌ای دارد و در آن کمتر به اعداد توجه می‌شود. از نمونه‌های تفسیر کیفی می‌توان به بیشتر یا کمتر بودن میزان رس در یک قسمت پروفیل در مقایسه با قسمت دیگر همان پروفیل اشاره 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 این گونه محیط‌ها در اختیار مفسران قرار می‌دهد. در تفسیر کمی اطلاعاتی مانند عمق، ضخامت، شدت بازتاب و موقعیت لایه‌بندی‌ها و توده‌های مورد بررسی مشخص می‌شود.

۳-۱۰- کاربردها[1]

- تخمین موقعیت (شامل عمق)، جهت، اندازه و شکل فلزات، خطوط لوله پلاستیکی، کابل‌های زیرزمینی و دیگر وسائل ساختگی مدفون (مانند بشکه‌ها و پی ساختمان)
- شناسایی حفرات درون توده‌های سنگ
- بررسی ساختارهای کارستی
- بررسی‌های نشست خاک
- بررسی رسوبات و ساختارهای خاک، شناسایی بین مناطق همگن و غیر همگن
- نقشه برداری رسوبات دریاچه و بستر رودخانه
- بررسی‌های زمین شناسی توده‌های یخچالی
- موقعیت گسل‌ها، بندها و شکاف‌ها در سنگ‌های مستحکم
- موقعیت عدسی‌های رسی، شکاف‌های یخ، کانسارهای زغال کوچک و غیره
- تخمین عمق سطح ایستابی در گراول، ماسه، و ماسه سنگ و نقشه برداری بستر سفره آب (در مورد آب با رسانندگی کم)
- تعیین وضعیت سیستم‌های خطی محل دفن باطله‌ها[2]
- تعیین ساختار سنگ در معادن نمک در حال اکتشاف برای استفاده به عنوان مخزن باطله
- شناسایی و نمایش تل[3]های آلوده
- تخمین درصد رطوبت خاک
- بررسی‌های لایه همیشه یخ بسته
- بررسی‌های یخ بندان شناسی (ترسیم ضخامت یخ، تعیین ساختارهای یخ زده میانی و غیره)
- شناسایی زمین‌های معدنی مدفون و مهمات منفجر نشده

---
[1] Applications
[2] landfill
[3] plume

- آنالیز کف سازی راه
- آزمایش یک پارچگی و درصد رطوبت مواد ساختمان
- آزمایش بتن و چک کردن موقعیت قالب‌های فولاد در آن
- موضع یابی ساختارهای پنهان و اشیا قبل (و یا حتی میان) کاوش‌های باستان شناسی

فصل چهارم

برداشت صحرایی و تفسیر دوبعدی (2D)

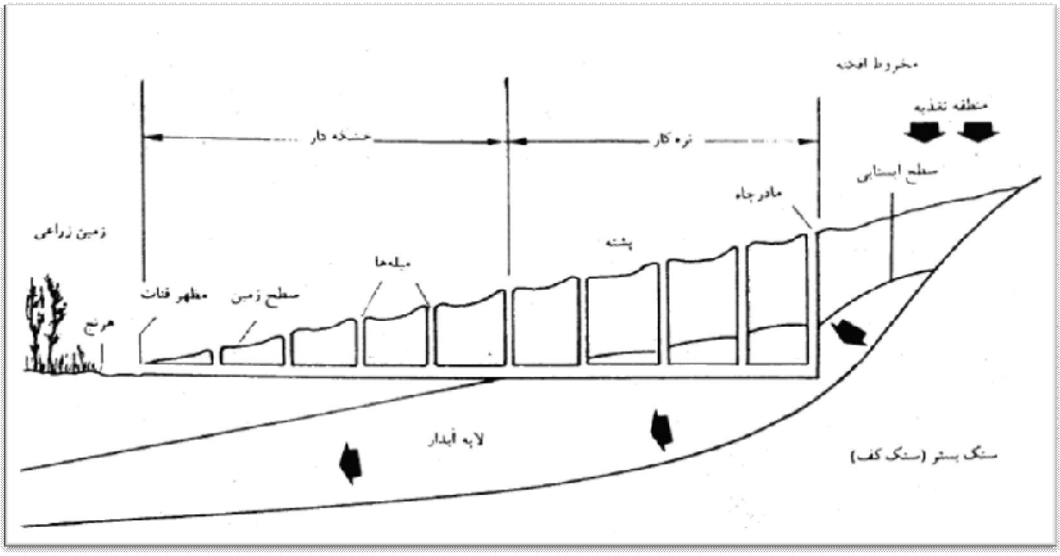
۴-۱- مقدمه

پیشتر اشاره شد که، موفقیت روش‌های ژئوفیزیک وابسته به تباین در مشخصه‌های فیزیکی اهداف زیرسطحی با محیط‌های دربرگیرنده است. آب‌های زیرزمینی به دلیل داشتن گذردهی دی الکتریک بالا در مقایسه با رسوبات و سنگ‌های تشکیل دهنده اطراف، اهداف خوبی برای آشکارسازی توسط روش‌های ژئوالکتریک می‌باشند. در این بررسی قنات به عنوان یک ساختار زیرسطحی مشخص و یک هدف خوب برای مقایسه دو روش توموگرافی الکتریکی و GPR مورد استفاده قرار گرفت و با انجام برداشت‌ها بر روی پروفیل‌های منظم به بررسی این دو روش و نقاط ضعف و قوت آنها پرداخته شد.

۴-۲- قنات

قنات یکی از راه‌های بهره برداری از آب‌های زیرزمینی است که اولین بار توسط ایرانیان مورد استفاده قرار گرفت. قنات عبارت است از یک مجرای آب زیرزمینی با شیب کم، همراه با تعدادی چاه قائم به نام میله که در زمین حفر می‌شوند. قنات‌ها را در رسوبات آبرفتی و به خصوص مخروط افکنه‌ها حفر می‌کنند. آب باران و آب‌های سطحی با نفوذ به درون رسوبات غالبا دانه درشت قسمت‌های بالای مخروط افکنه، مخازن آب زیرزمینی غنی در آنها را تغذیه می‌کند [ولایتی، ۱۳۷۴].

قسمت‌های مختلف یک قنات در شکل ۱-۴ نشان داده شده است. قنات از یک تونل طولانی برای انتقال آب تشکیل شده که "پیشکار یا کوره" نامیده می‌شود. بر روی این پیشکار و در فواصل معین از یکدیگر چاه‌هایی قرار دارد که هدف از ایجاد این چاه‌ها (میله) حفر پیشکار و انتقال خاک به بیرون از قنات و انتقال مصالح به داخل می‌باشد.



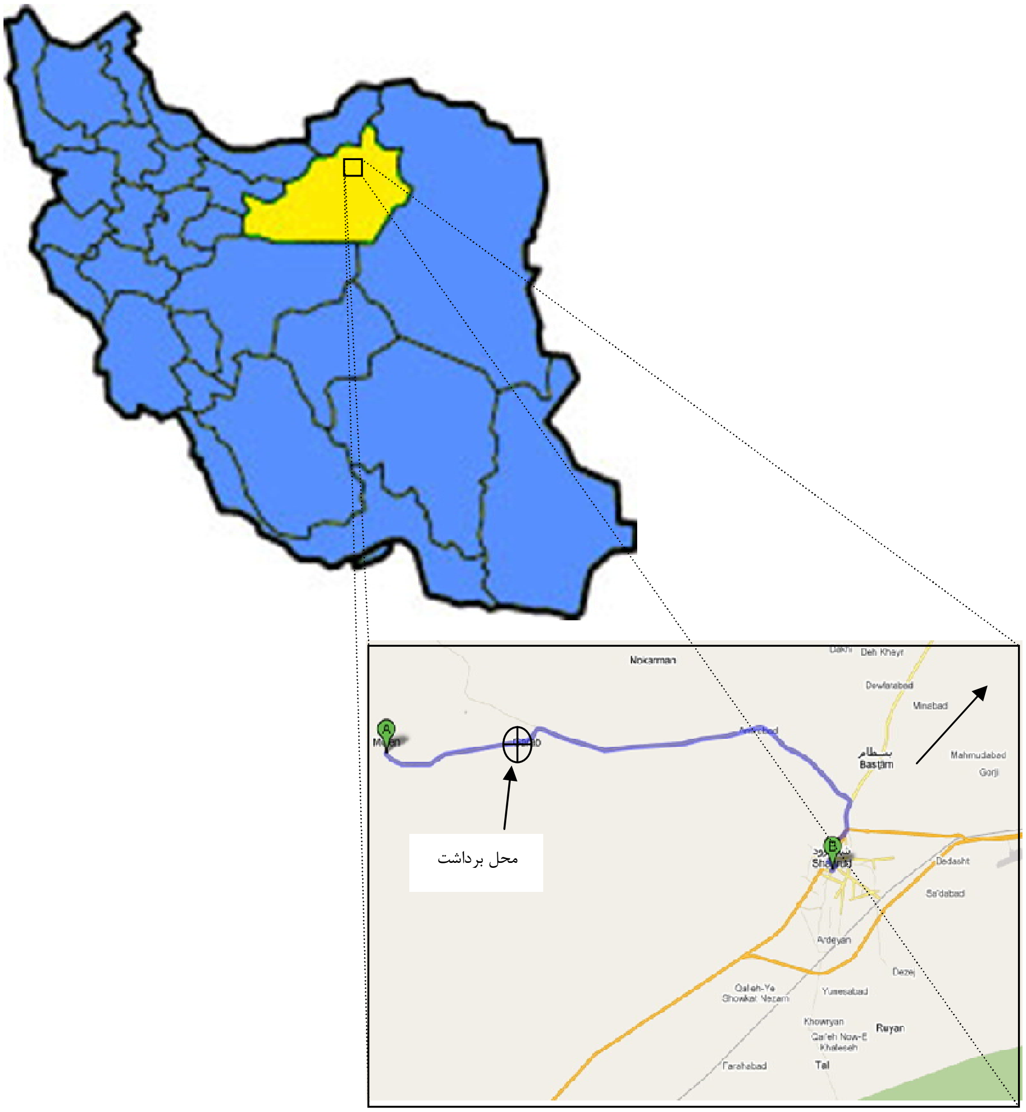
شکل ۴-۱: قسمت‌های مختلف قنات [ولایتی، ۱۳۷۴]

همان طور که مشاهده می‌شود قنات به دو قسمت اصلی تقسیم می‌شود. قسمت اول با نام تره کار ، قسمتی از قنات است که درون آب‌های زیرزمینی قرار دارد. این قسمت منشا قنات می‌باشد که تغذیه آب قنات در آن صورت می‌گیرد. بخش دوم خشکه کار نام دارد که بالاتر از سطح آب زیرزمینی قرار گرفته است. در قنات آب تغذیه شده در قسمت تره کار به دلیل شیب کم پیشکار به سمت مظهر قنات (محل خروج آب) جاری می‌شود [ولایتی، ۱۳۷۴].

۴-۳- موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

برداشت صحرایی توموگرافی الکتریکی و GPR بر روی قناتی واقع در منطقه مجن از توابع شهرستان شاهرود (شکل ۴-۲) انجام شد. مظهر این قنات در حدود ۳۰ کیلومتری شمال-شمال‌غربی شهر شاهرود در محدوده باغ سینا از توابع روستای درخانیاب مجن و ۶ کیلومتری شرق

شهر مجن قرار دارد. این قنات از کوه‌های شمال محدوده مورد نظر سرچشمه می‌گیرد. به نظر می‌رسد که رشته قنات مورد نظر دارای طولی در حدود (و یا بیش از) ۱۰ کیلومتر می‌باشد.



شکل ۴-۲: موقعیت جغرافیایی منطقه برداشت [www.maps.google.com]

از نظر زمین شناسی منطقه مورد بررسی در ایالت ساختاری البرز قرار دارد. اطراف محل برداشت، ارتفاعات البرز خاوری قرار دارند که نمایانگر عملکرد رویدادهای کوهزایی[1]، خشکی زایی و حرکات زمین ساختی مختلف و در نتیجه خوردگی و گسلش‌های متعدد ناشی از آنهاست که سبب گردیده در منطقه مورد مطالعه ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی و همچنین راندگی‌های متعددی به وجود آید [نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود].

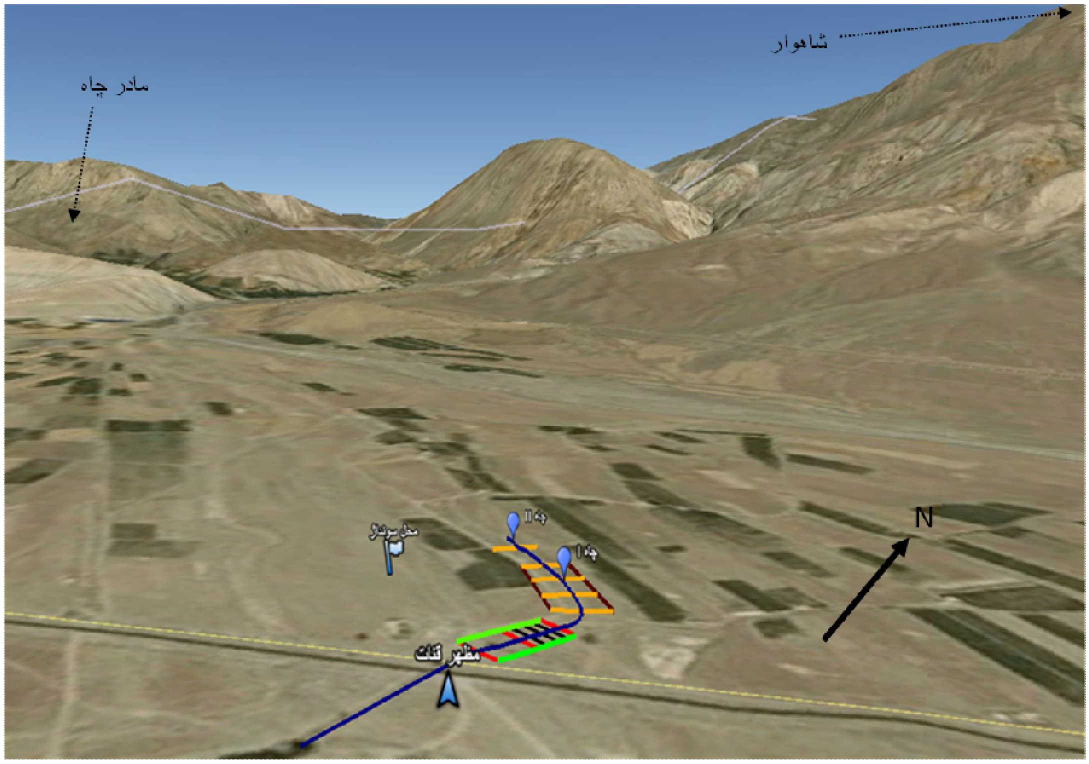
کوه‌های این منطقه از نوع آهکی با شکستگی‌های کارستی بوده که دارای منابع خوب آب زیرزمینی می‌باشند. از این نظر در قسمت جنوب این منطقه سه قطعه چاه حفر شده که این چاه‌ها یکی از منابع مهم تامین آب شرب شهر شاهرود به حساب می‌آیند [کرمی، ۱۳۷۷].

در قسمت شمالی منطقه برداشت نیز مرتفع ترین کوه‌های استان سمنان از جمله شاهوار (با ارتفاع بیش از ۴۰۰۰ متر) قرار دارند که بارش‌های زیاد در این ارتفاعات به عنوان منبع تغذیه آب‌های زیرزمینی، قنات‌ها و رودخانه مجن اهمیت ویژه‌ای دارد.

قنات مورد بررسی در زمین‌های آبرفتی به وجود آمده از فرسایش این ارتفاعات قرار دارد و مادر چاه قنات و قسمت تره کار آن نیز در مخروط افکنه ارتفاعات شمالی این محدوده حفر گردیده است. در شکل ۴-۳ ارتفاعات منطقه و وضعیت توپوگرافی محدوده برداشت و موقعیت تقریبی مادر چاه قنات نشان داده شده است.

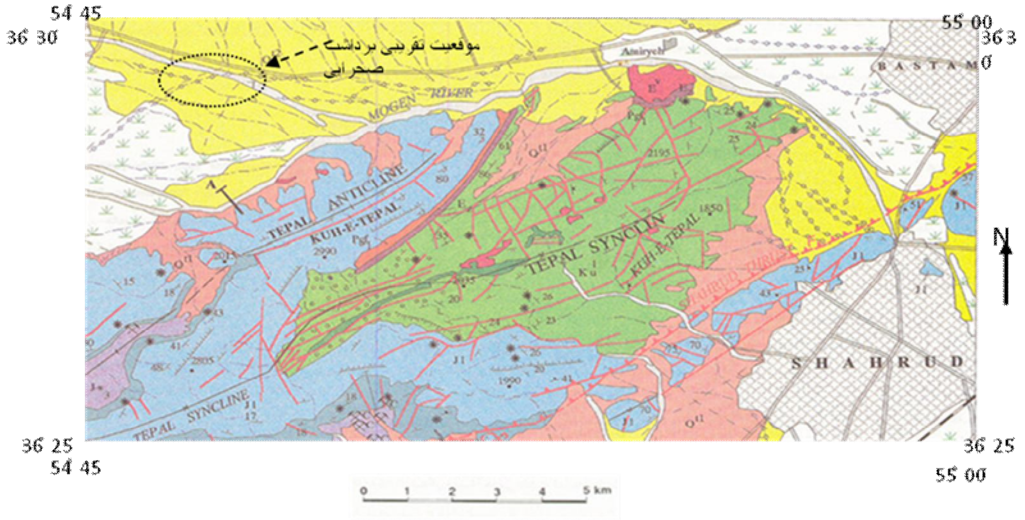
---

[1] Oraganic phases



شکل ۴-۳: نمایی از محل برداشت و ارتفاعات اطراف منطقه برداشت

طبق نقشه زمین شناسی شکل (۴-۴) ، محل بررسی قنات مورد مطالعه بر روی رسوبات کواترنری جدید شامل نهشته‌های آبرفتی و مخروط افکنه های جوان قرار دارد که در نقشه با علامت Q^{t2} مشخص می‌باشد.



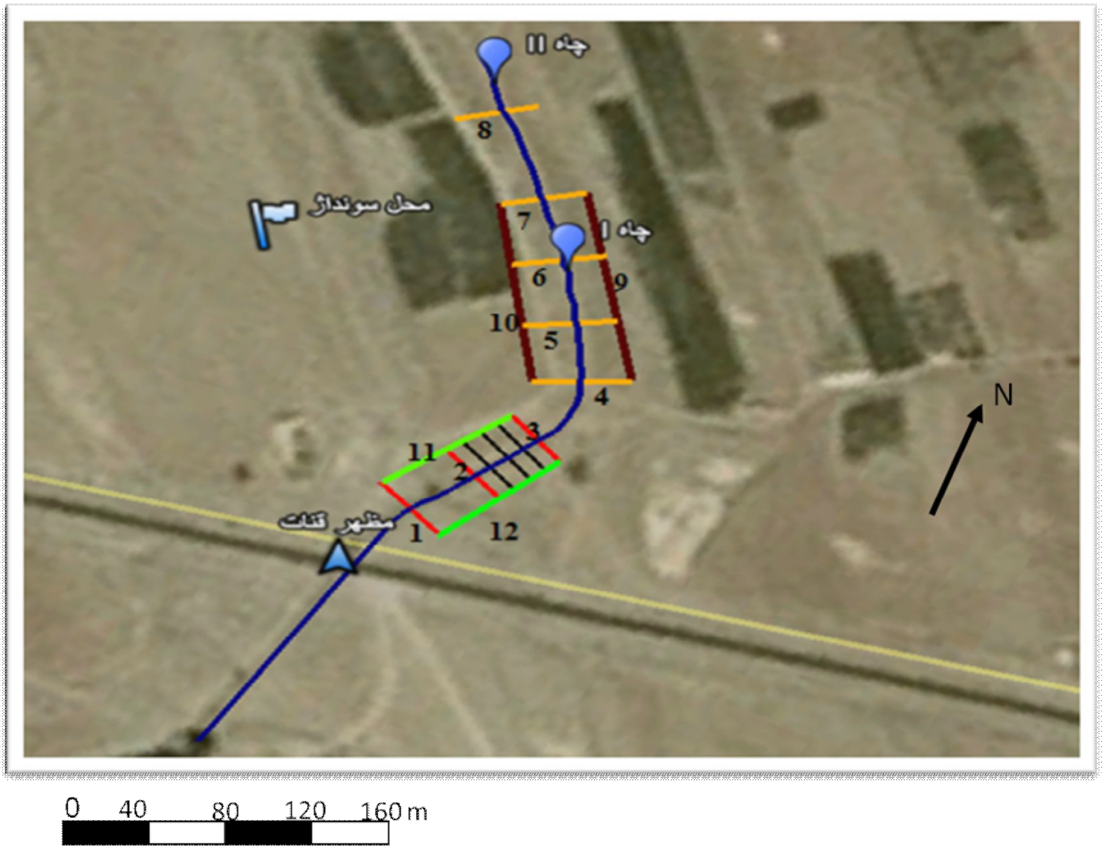
شکل ۴-۴: نقشه زمین شناسی منطقه [قسمتی از نقشه زمین شناسی شاهرود ۱:۱۰۰۰۰۰]

۴-۴- عملیات برداشت صحرایی

برای انتخاب پروفیل‌های مناسب یک نقشه‌برداری ابتدایی توسط متر، کمپاس و GPS بر روی منطقه عملیاتی صورت گرفت. با توجه به ذات داده‌های GPR می‌بایستی هدف مورد مطالعه در عمق کمی قرار گرفته باشد. از این رو برداشت‌ها در نزدیک مظهر قنات انجام گرفت.

در مورد این قنات باید ذکر کرد که نزدیک به انتهای آن به منظور انتقال آب به استخر پرورش ماهی که در منطقه قرار دارد، جهت قنات به سمت این استخر تغییر داده شده است. این قنات در طول انتقال آب به استخر پرورش ماهی جاده آسفالت را قطع می‌کند. در فاصله ۶ متری بعد از جاده بر روی کانال انتقال یک خروجی کوچک آب به منظور استفاده عابرین قرار داده شده است که، آن را مظهر قنات در نظر می‌گیریم. مسیر اصلی قنات در راستای آزیموت N145 قرار دارد، اما در فاصله ۱۵۵ متری مظهر آن به منظور انتقال آب به استخر پرورش ماهی مسیر قنات به آزیموت N30 تغییر جهت داده شده است. به منظور دست‌یابی به حداکثر پاسخ‌ها، پروفیل‌های برداشتی در راستای

روند بیشترین تغییرات، یعنی عمود بر امتداد قنات انتخاب شدند. بنابراین برداشت‌ها به دو بخش تقسیم شد. بخش اول منطقه نزدیک مظهر قنات است که قنات در این بخش دارای جهت N30 می‌باشد و پروفیل‌ها بر روی این قسمت از قنات با امتداد N120 برداشت شدند. بخش دوم بر روی قسمتی از قنات که دارای جهت بدون تغییر N145 است، برداشت گردید. پروفیل‌های برداشت شده در بخش دوم دارای آزیموت N235 می‌باشند. با ثبت نقاط ابتدا و انتهای هر پروفیل توسط GPS، موقعیت این پروفیل‌ها ترسیم (۴شکل -۵). در بخش اول (نزدیک مظهر قنات) ابتدا سه پروفیل با فاصله ۴۰ متر از یکدیگر و به موازات هم برداشت شد که به ترتیب پروفیل ۱، ۲ و ۳ نامگذاری گردیدند، که در شکل ۴-۵ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۵: نمای هوایی از محل برداشت داده‌ها و محل برداشت پروفیل‌ها و سونداژ
[www.googleearth.com]

در بخش دوم (جهت اولیه قنات) نیز ۵ پروفیل به موازات یکدیگر برداشت گردید که با نام پروفیل‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ نامگذاری شدند. طول این پروفیل‌های برداشتی نیز ۴۰ متر است که سعی شده قنات در وسط هر پروفیل قرار گرفته باشد. (شکل ۴-۵). پس از انجام برداشت‌های عمود بر جهت قنات، در هر بخش ۲ پروفیل به موازات مسیر قنات به گونه‌ای برداشت شد که یکی از این پروفیل‌ها، ابتدای پروفیل‌های عمود بر قنات و پروفیل دیگر انتهای این پروفیل‌ها را به هم متصل کند. برداشت این پروفیل‌های موازی با قنات به منظور انجام مدل‌سازی سه‌بعدی دقیق‌تر، بررسی توزیع مقاومت ویژه بهتر در جهات مختلف و همچنین تلفیق روش توموگرافی الکتریکی با داده‌های GPR در شناسایی لایه‌بندی و مقایسه بهتر این دو روش است. پروفیل‌های موازی با جهت قنات با شماره‌های ۹ تا ۱۱ در شکل ۴-۵ قابل مشاهده می‌باشند.

پس از برداشت پروفیل‌های مذکور به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی بین پروفیل‌های ۲ و ۳ و به فاصله ۱۰ متر از یکدیگر ۳ پروفیل الکتریک دیگر برداشت گردید که به ترتیب با نام‌های پروفیل اول، پروفیل دوم و پروفیل سوم نامگذاری شدند. در نتیجه در یک فاصله ۴۰ متری، ۵ پروفیل مقاومت ویژه (توموگرافی الکتریکی) برداشت گردید تا بتوان در این قسمت مدل‌سازی سه‌بعدی دقیقی را انجام داد. برای مدل‌سازی GPR نیز در بین پروفیل‌های ۲ و۳ و این بار با فواصل کوتاه‌تر ۵ متر، ۷ پروفیل GPR برداشت شد. به عبارت بهتر در این فاصله ۴۰ متری ۹ پروفیل برای مدل‌سازی سه‌بعدی GPR به دست آمد. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای مدل‌سازی سه‌بعدی از آنجایی که برداشت رادار سریعتر از برداشت توموگرافی الکتریکی است، فواصل بین پروفیل‌های رادار نصف فاصله بین پروفیل‌های مقاومت ویژه می‌باشد که نتایج این فواصل کوتاه‌تر در مدل‌سازی مشاهده خواهد شد. (شکل ۴-۵).

تمام برداشت‌های مقاومت ویژه با استفاده از آرایه دوقطبی- دوقطبی انجام گرفت که در آن فاکتور n برای هر جفت الکترود جریان از ۱ تا ۶ افزایش یافته است. دلیل انتخاب آرایه دوقطبی-

دوقطبی، در حساسیت بالای این آرایه به تغییرات قائم (جانبی) مقاومت ویژه بوده که باعث شده این آرایه در به نقشه درآوردن ساختارهای قائم مانند دایک‌ها و حفرات نسبت به دیگر آرایه‌ها قوی‌تر باشد [Loke, 2004]. دلیل دیگر این انتخاب پوشش جانبی خوب آرایه دوقطبی- دوقطبی به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی می‌باشد [Marescot, 2009].

در تمامی پروفیل‌ها ابتدا داده‌های توموگرافی الکتریکی برداشت شد. پس از اندازه گیری مقاومت ویژه در هر پروفیل برداشت GPR نیز بر روی پروفیل مذکور انجام گرفته است.

پس از اتمام برداشت پروفیل‌های در نظر گرفته شده بر روی قنات، به منظور شناسایی وضعیت لایه بندی منطقه در فاصله‌ای مناسب از قنات که در آن لایه‌بندی منطقه حفظ شده باشد و داده‌های ما تحت تاثیر قنات قرار نگیرد، یک سونداژ الکتریکی مقاومت ویژه به وسیله آرایه شلومبرگر با AB = 400 m برداشت شد. محل این سونداژ در شکل‌های ۴-۳ و ۴-۵ قابل مشاهده و بررسی است.

در بخش اول یعنی محل برداشت پروفیل‌های ۱ تا ۳ عمق آب تقریبا ثابت و در عمق حدودی ۰/۵ تا ۱ متر قرار دارد که برای حفاظت از حفره انتقال آب از بلوک‌های سیمانی استفاده شده است و در بعضی قسمت‌ها در اطراف این بلوک‌ها رس نیز مشاهده می‌شود. در بخش دوم نیز (محل پروفیل‌های ۴ تا ۸) در دو نقطه از مسیر قنات امکان اندازه گیری سطح آب وجود داشت که موقعیت این نقاط در شکل ۴-۵ قابل مشاهده است. نقطه اول در فاصله ۷/۵ متر پایین‌تر از پروفیل ۶ می‌باشد که عمق آب در این قسمت ۲/۸۵ متر است. نقطه دیگر در ۱۷/۵ متر بالاتر از پروفیل ۸ قرار دارد که عمق آب در این مکان ۵/۳۵ متر ثبت شد. با توجه به عمق آب در محل تغییر جهت قنات که در حدود ۹۰ سانتیمتر تا ۱ متر بود و شیب یکنواخت دشت در محل برداشت امکان درون یابی عمق آب قنات در محل پروفیل‌های برداشتی با تقریب خوبی امکان پذیر بوده است. 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 توموگرافی الکتریکی و GPR نمی‌باشد.

یکی دیگر از مشکلات برداشت تغیرات توپوگرافی بسیار کم و بخشی (مانند وجود جوی آب) و یا حتی وجود بوته‌های گیاهان در مسیر برداشت‌های صحرایی بود. این عوامل هر چند تاثیری در برداشت الکتریکی نداشتند اما در برداشت GPR به صورت یک پدیده ایجاد کننده نوفه حساب شده و باعث کاهش اعتبار داده‌های برداشتی با این روش می‌شود. از این رو قبل از هر برداشت GPR ابتدا مسیر عبور دستگاه به دقت بررسی و مسطح شد، اما با این حال در تفسیر هنوز هم در بعضی نقاط این عوامل اثر خود را نشان می‌دهند که این خود از نقاط ضعف روش GPR می‌تواند به حساب آید و نکته جالب این است که این اشکال به خاطر قدرت تفکیک بالای روش GPR حاصل می‌شود.

داده‌های توموگرافی الکتریکی (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[1] 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 [Sensor and Software, 1999]. دستگاه GPR در برداشت‌ها توسط یک وسیله یدک می‌شود. در برداشت‌های انجام گرفته در این بررسی دستگاه را بر روی یک کالسکه مخصوص که برای حمل این دستگاه ساخته شده قرار گرفت. در حالت کلی وسیله حمل دستگاه دارای یک کیلومتر شمار با دقت بالا می‌باشد. با یدک شدن و حرکت دستگاه توسط این وسیله، کیلومترشمار در فواصل معینی دستگاه GPR را بکار انداخته و داده‌ها برداشت می‌شوند. در این برداشت‌ها نیز از دستگاه به یکی از چرخ‌های این کالسکه سنسوری وصل شده بود که با چرخش چرخ کالسکه طول پروفیل مشخص می‌شود. از

[1] Shielded

این رو سرعت برداشت داده‌های GPR بسیار بالا بوده و اندازه گیری در هر پروفیل در کمتر از ۵ دقیقه صورت گرفت.

داده‌های برداشت شده در حافظه نمایشگر دستگاه[1] (DVL) ذخیره شده و توسط نرم افزار WinPXFER با پسوند DT1 به کامپیوترهای شخصی انتقال می‌یابند تا توسط نرم افزارهای مختلف برای نمایش و پردازش آنها اقدام گردد. همراه با داده‌های ذخیره شده، یک سری از 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 ایستگاهی، فاصله آنتن‌ها، تعداد ردهای دسته شده، فواصل نمونه گیری، شیوه برداشت و برخی اطلاعات دیگر نظیر تاریخ برداشت داده‌ها در این فایل ذخیره می‌شود. اطلاعات موجود در این قسمت برای اعمال برخی پردازش ها که از این اطلاعات بهره می‌برند بسیار حائز اهمیت است.

۴-۵- تفسیر داده‌های سونداژ الکتریکی

در ابتدا و قبل از بررسی پروفیل‌های برداشتی، تفسیر سونداژ الکتریکی برداشت شده در منطقه ضروری به نظر می‌رسد. این سونداژ به منظور بررسی وضعیت لایه بندی زیرسطحی در داخل منطقه و در فاصله مناسب از پروفیل‌ها و قنات برداشت گردید.

ابتدا به وسیله GPS موقعیت سونداژ تعیین شد، در نهایت با بررسی شرایط زمین شناسی منطقه و بررسی مقدماتی امتداد لایه‌ها و جهت قنات، این سونداژ با آزیموت 150 برداشت گردید. در این سونداژ فاصله الکترودهای جریان در حداکثر فاصله از یکدیگر ۴۰۰ متر می‌باشد (AB=400 m).

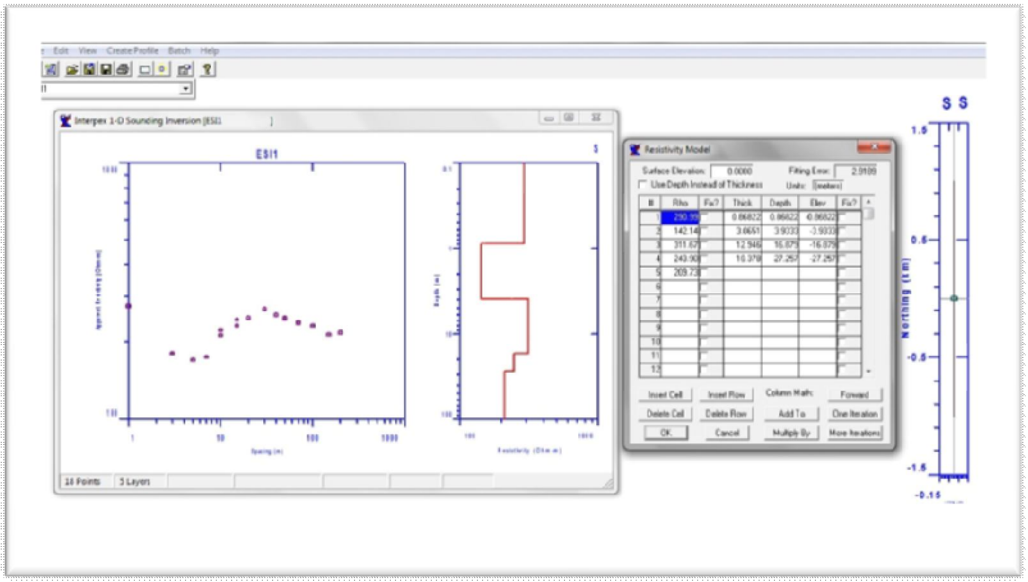
[1] Digital Video Logger

پس از برداشت این سونداژ و محاسبه مقاومت ویژه ظاهری، نوبت به تفسیر کمی این سونداژ رسید. در تفسیر کمی از داده‌های خام (مقادیر مقاومت ویژه ظاهری)، یک سری پارامترهای فیزیکی شامل مقاومت ویژه واقعی و ضخامت لایه‌ها تعیین می‌شوند [Reynolds, 1997].

برای تفسیر کمی، از منحنی‌های استاندارد و نرم افزارهای IX1D و VES استفاده شده است. منحنی‌های سونداژ الکتریکی در ابتدا با استفاده از منحنی‌های استاندارد دستی تفسیر شد. سعی شده تا تفسیر دستی با حداکثر دقت انجام گیرد. برای تفسیر دقیق‌تر و مطمئن‌تر از نرم افزارهای کامپیوتری نیز برای تفسیر استفاده گردید. مدل به دست آمده از تفسیر دستی به عنوان مدل اولیه به نرم افزارهای فوق داده شده است.

در ابتدا داده‌های مقاومت ویژه و مدل به دست آمده از تفسیر دستی توسط منحنی‌های استاندارد را در نرم افزار IX1D وارد کردیم. پس از اعمال پردازش رو به جلو[1] میزان خطای RMS error مقدار نسبتا پایین ۹/۸٪ بین داده‌های برداشتی و مدل محاسبه شده با منحنی‌های استاندارد را نشان داد. این خطای نسبتا پایین نشان دهنده تفسیر توسط منحنی‌های استاندارد با دقت خوب است. سپس با انجام پردازش معکوس[2] بر روی داده‌ها و مدل بهترین مدل را انتخاب کردیم که در شکل ۴-۶ با خطای پایین RMS error ۴/۵٪ نشان داده شده است.

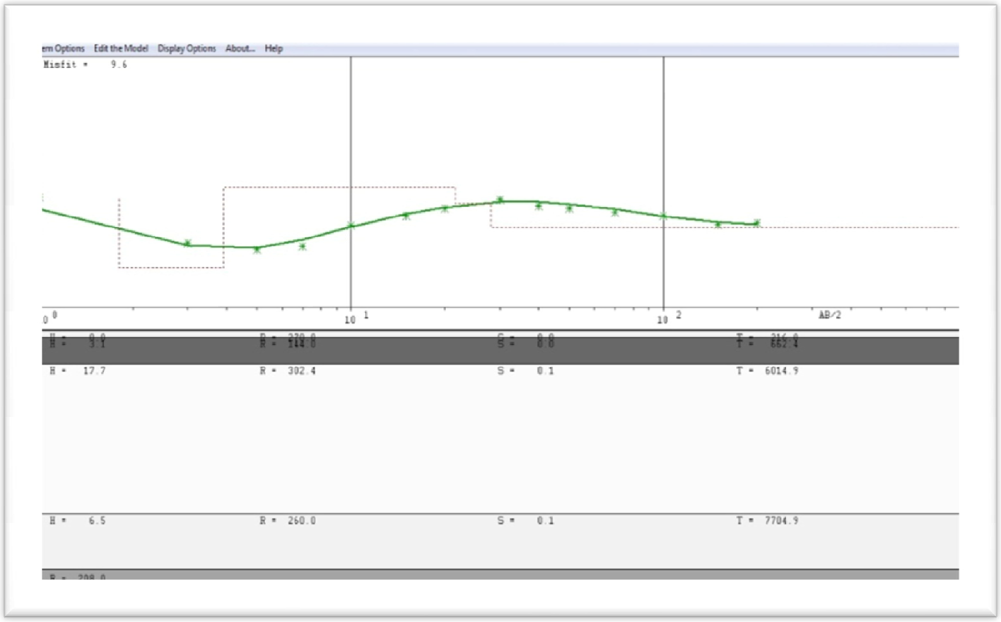
[1] Forward
[2] Backward



شکل ۴-۶ : مدل نهایی به دست آمده با نرم افزار IX1D

بار دیگر پردازش این سونداژ با استفاده از نرم افزار VES انجام پذیرفت. مانند نرم افزار IX1D مدل اولیه ورودی در این نرم افزار نیز مدل حاصل از تفسیر دستی بود که میزان عدم انطباق[1] آن در این نرم افزار ۱۶/۱ بود. سپس با اعمال معکوس سازی بهترین منحنی حاصل با عدم انطباق ۹/۶ به دست آمد (شکل ۴-۷).

[1] Misfit



شکل ۴-۷: مدل نهایی به دست آمده با نرم افزار VES

مدل‌های به دست آمده از هر سه روش تفسیر دستی، تفسیر با نرم افزار IX1D و تفسیر با نرم افزار VES در جدول ۴-۱ آورده شده است.

جدول ۴-۱: نتایج حاصل از تفسیر سونداژ به کمک روش‌های مختلف

	تفسیر با منحنی‌های استاندارد		تفسیر با نرم افزار VES Misfit= 9.6		تفسیر با نرم افزار IX1D RMS error = 4.5%	
مشخصات	ρ (Ω.m)	d (m)	ρ (Ω.m)	d (m)	ρ (Ω.m)	d (m)
لایه اول	۲۷۰	۱	۲۷۶	۰/۸	۲۹۰	۰/۸
لایه دوم	۱۶۰	۴/۵	۱۴۴	۳/۹	۱۴۲	۳/۹
لایه سوم	۲۵۲	۱۷/۵	۳۰۲	۲۱/۶	۳۱۱	۱۶/۹
لایه چهارم	۲۶۰	۲۸	۲۶۰	۲۸/۱	۲۴۳	۲۷/۳
لایه پنجم	۲۰۸	-	۲۰۸	-	۲۰۹	-

داده های نرم افزار VES با داده‌های نرم افزار IX1D انطباق خوبی دارد که نشان دهنده قابل اعتماد بودن نسبتا خوب تفسیر بر روی این سونداژ می‌باشد.

در تفسیر این سونداژ ۵ لایه مشاهده می‌شود که در بازه تغییرات مقاومت ویژه ۱۴۰ تا ۳۱۱ اهم متر قرار دارند و با توجه به مشاهدات منطقه، که نشان می‌دهد منطقه مورد بررسی دارای پوشش رسوبی است، می‌توان لایه‌بندی مذکور را شامل آبرفت های دانه متوسط دانست که در بعضی عمق ها ابعاد ذرات کوچک و میزان رس زیاد شده و در بعضی اعماق حالت معکوس آن اتفاق می‌افتد. با توجه به مقاومت ویژه و مشاهدات صحرایی، در سطح دانه‌بندی نسبتا درشتی مشاهده می‌شود که این روند به سمت عمق با کاهش ابعاد دانه بندی مواجه می شود به طوریکه کاهش مقاومت ویژه در عمق ۱ تا ۴ متری نشان دهنده کاهش ابعاد ذرات و افزایش رس در این عمق می‌باشد. با حرکت به سمت عمق بار دیگرافزایش مقاومت ویژه قابل رویت بوده که نشان دهنده افزایش مجدد ابعاد دانه‌بندی است.

۴-۶- بررسی پروفیل‌های برداشت شده

۴-۶-۱- اندازه گیری و مقایسه بر روی پروفیل‌های عمود بر قنات در بخش اول

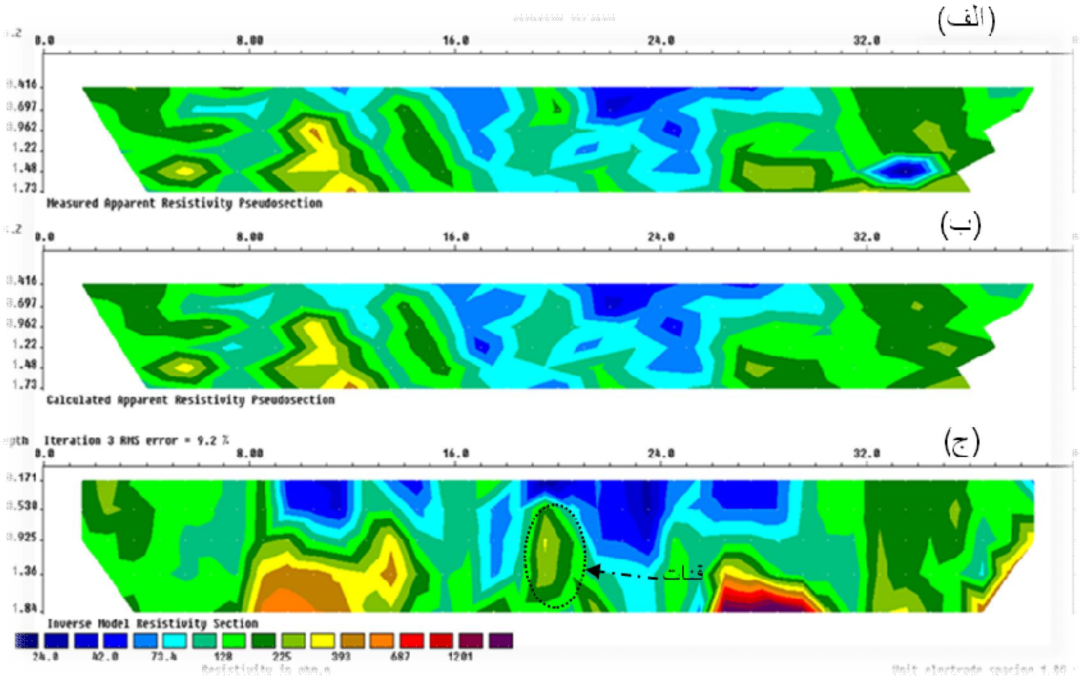
بخش اول از پروفیل‌های برداشتی شامل ۳ پروفیل است که با آزیموت N120 و فاصله الکترودی ۱ متر و طول ۴۰ متر به گونه ای برداشت شدند تا قنات از مرکز پروفیل بگذرد.

۴-۶-۱- ۱- بررسی پروفیل ۱

اولین پروفیل برداشتی یعنی پروفیل ۱ با طول ۴۰ متر، در فاصله ۴۷/۵ متری از مظهر قنات و عمود بر آن، برداشت شده است. این پروفیل مانند پروفیل‌های دیگر با آرایه الکترودی دوقطبی- دوقطبی برداشت گردید. از آنجایی که عمق قنات در این قسمت کم می‌باشد، برداشت

پروفیل با فاصله الکترودی ۱ متر انجام گرفت. فاصله الکترودی نسبتا کم ۱ متر بدلیل عمق کم هدف و بررسی دقیق‌تر تغییرات مقاومت ویژه زیرسطحی به منظور افزایش قدرت تفکیک انتخاب شد. شکل ۴-۸ شبه مقطع و مقطع مدل‌سازی شده وارون دوبعدی مقاومت ویژه مربوط به این پروفیل که با استفاده از نرم افزار RES2DINV به دست آمده است را نشان می‌دهد.

همان‌طور که از روی مقطع پروفیل مقاومت ویژه دیده می‌شود، روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه مجموعه هوا، بتن و آب موجود در کانال را در مقایسه با محیط اطراف خود به عنوان توده‌ای با مقاومت ویژه تا حدودی بالاتر به نقشه درآورده است، که این موضوع در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود (شکل (ج)). کانال آب در موقعیت ۱۹ تا ۲۰ متری و در عمق تقریبی ۰/۵ تا ۱/۴ متر قرار دارد. مقاومت ویژه قنات دارای تغییراتی در بازه ۲۰۰ تا ۴۰۰ اهم متر می‌باشد. که این بازه مقاومت ویژه نشان‌دهنده تاثیر بیشتر بتن و هوا نسبت به آب بر برداشت‌ها بوده است. البته از آنجایی که حجم کمتر قنات از آب پر شده و بیشتر فضای قنات را هوا تشکیل می‌دهد و همچنین به دلیل وجود کول‌های سیمانی به عنوان پوشش قنات وجود مقاومت ویژه نسبتا بالا در محل قنات قابل پیش‌بینی بود. با توجه به نزدیکی نسبی مقاومت ویژه بعضی از قسمت‌های اطراف قنات به مقاومت ویژه قنات، این کانال شدت زیادی نسبت به محیط اطراف خود ندارد. نکته دیگر مقاومت ویژه پایین زمین‌های اطراف قنات است که دلیل اصلی آن را می‌توان نفوذ آب از قنات به این قسمت‌ها و مرطوب کردن این زمین‌ها دانست. البته از احتمال رسی بودن این زمین‌ها نیز نمی‌توان صرف نظر کرد. مقدار مقاومت ویژه زمینه در این پروفیل در حدود ۱۵۰ اهم متر می‌باشد که نشان دهنده این واقعیت می‌باشد که پوشش زمینه در این پروفیل بیشتر از آبرفت‌های دانه متوسط پوشیده شده است. البته باید توجه شود که در بعضی از قسمت‌ها به دلیل تاثیر رطوبت و یا افزایش میزان رس مقاومت ویژه کاهش نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۱ با فاصله الکترودی ۱ متر (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در فاصله ۸ تا ۱۲ متری و از عمق ۱/۳ متری تا کف پروفیل مقاومت ویژه افزایش نشان می‌دهد که دلیل آن احتمالا افزایش دانه بندی ذرات و یا کاهش شدید رس و افزایش میزان شن و ماسه در این قسمت است. در فاصله ۲۶ تا ۳۰ متری و در عمق ۱/۵ متری نیز افزایش شدیدی در مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که با توجه به شدیدتر بودن افزایش مقاومت ویژه در این قسمت احتمال افزایش دانه بندی و تغییر ذرات از رس به شن و ماسه کم بوده و دلیل این افزایش زیاد را می‌توان وجود احتمالی سنگ هوازده نشده نابرجا با ابعاد متریک و یا وجود حفرات هوا دانست.

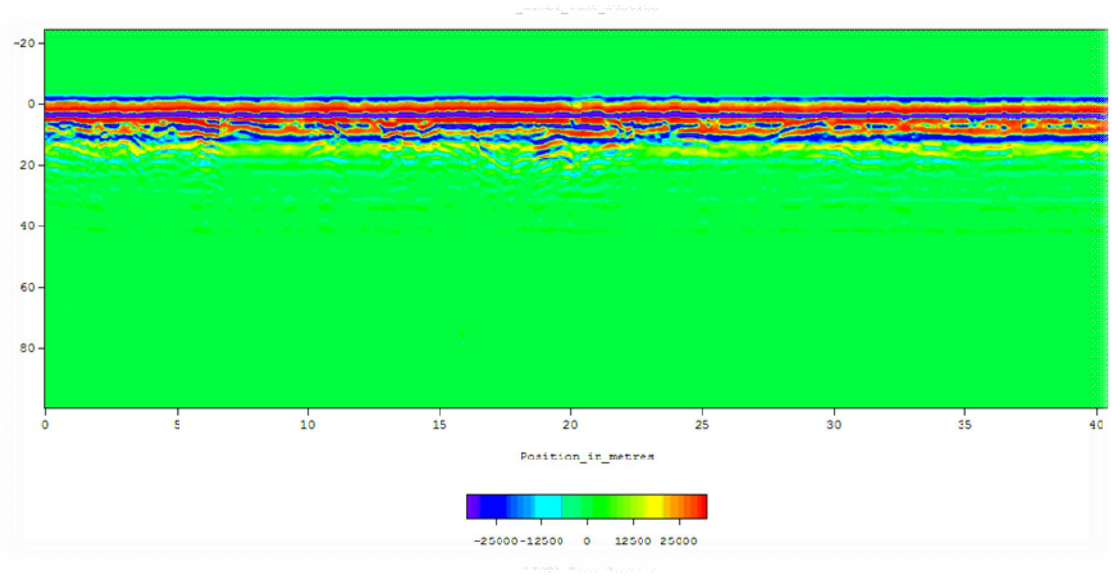
برداشت GPR پروفیل ۱ بعد از پایان برداشت الکتریک این پروفیل و به طول ۴۰ متر بر روی مسیر برداشت الکتریک انجام گرفت. این حالت برای بقیه پروفیل‌ها نیز به همین صورت تکرار شده است.

اندازه گیری‌های داده‌های GPR با فواصل ایستگاهی ۵ سانتیمتر انجام گرفت و از آنجایی که هدف در عمق کمتر از ۲ متر قرار دارد، پنجره زمانی را برابر ۱۰۰ نانوثانیه در نظر گرفتیم. برای حذف نوفه های پیشای محیطی و همچنین عدم بالا بودن زمان برداشت، تعداد ردهای دسته شونده[1] برابر با مقدار پایین ۳۲ رد در نظر گرفته شده است.

برای پرهیز از یکنواختی بررسی بر روی هر پروفیل و نمایش اثرات پردازش با بهره‌های مختلف سعی شده تا در این مطالعه بر روی هر پروفیل از بهره‌ای متفاوت با بهره استفاده شده در دیگر پروفیل‌ها استفاده شود.

شکل ۴-۹ مقطع زمانی داده‌های GPR می‌باشد که با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک[2]، به وسیله نرم افزار Win-Ekko Pro بدست آمده است. برای نمایش این مقطع و دیگر مقاطع دوبعدی GPR از نرم افزار Transform استفاده گردید.

[1] Stack
[2] autogain



شکل ۴-۹: مقطع زمانی پروفیل ۱ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک

همان طور که در شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود، دستگاه‌های GPR در واقع زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند. در نتیجه مقطع نمایش داده یک مقطع زمانی می‌باشد که در آن محور قائم فاصله زمانی ارسال موج از فرستنده و دریافت توسط گیرنده را نشان می‌دهد. برای تعیین موقعیت مکانی رویدادها، باید این زمان‌ها به عمق تبدیل شوند یعنی این مقطع به مقطعی که محور قائم آن عمق را نمایش دهد، تبدیل شود. برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد مطالعه محاسبه شود. 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 دارند که عبارتند از:

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

۲) استفاده از اهداف مدفون در عمق معین

۳) تخمین سرعت با توده‌های زیرسطحی با توجه به محیط مورد بررسی [Sensor and software, 1999]

در روش هذلولی پراش باید به این نکته توجه نمود که به هنگام پروفیل زنی، در صورت عبور دستگاه GPR از روی یک جسم بازتاب‌کننده قوی نظیر لوله فلزی، بازتاب‌های حاصل از این جسم بر روی مقاطع زمانی رادار به شکل هذلولی خواهد بود. با توجه به نکته فوق در صورت عبور پروفیل برداشتی از روی این بازتاب کننده‌ها و مواجهه با هذلولی پراش برای تعیین سرعت پالس در زمین از گزینه CALIB که به هنگام پروفیل‌زنی در صفحه DVL دستگاه ظاهر می‌شود، استفاده می-کنیم. با انتخاب این گزینه یک هذلولی بر روی DVL ظاهر می‌شود. با جابجایی این هذلولی و انطباق کامل آن با هـذلولی ناشی از جسم بـازتاب کننده، سرعت متوسـط پالس توسط دسـتگاه محاسبه می‌شود [مزینانی، ۱۳۸۹].

اهداف مدفون در اعماق معین نیز می‌تواند یکی از روش‌های تعیین سرعت سیر موج در زمین باشد. اگر عمق یک هدف که بر روی مقطع GPR مشخص است، در دست باشد می‌توان با استفاده از مقادیر مختلف سرعت در نرم‌افزار و مقایسه بین مقطع عمقی به دست آمده و عمق هدف سرعت دقیق را تعیین کرد.

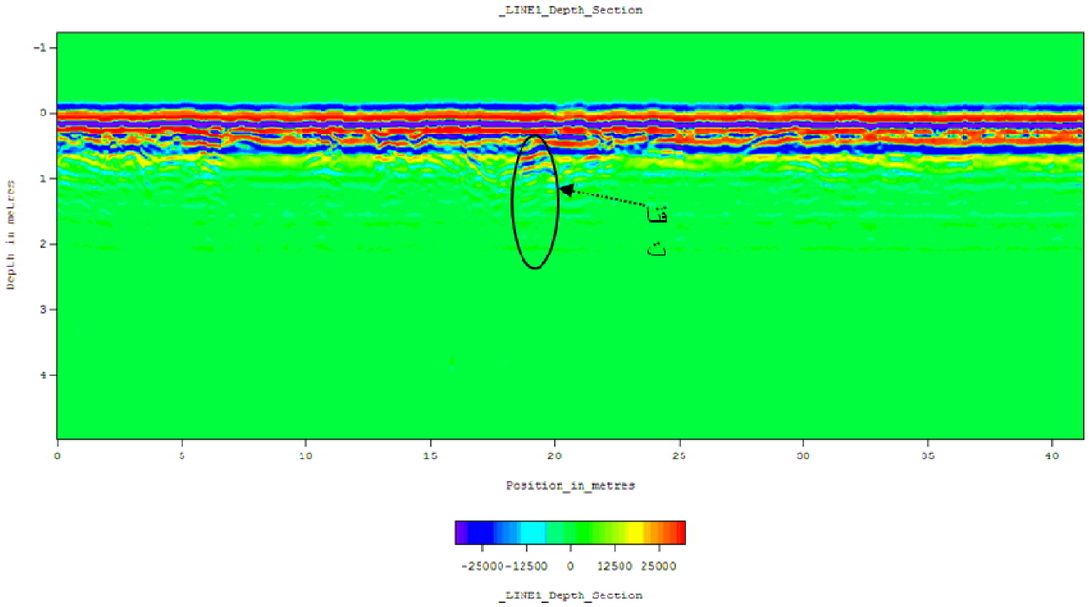
راه دیگر پیدا کردن سرعت متوسط سیر امواج GPR در منطقه مورد بررسی، تعیین سرعت سیر امواج GPR برای انواع مختلف مواد و رسوبات موجود است. در صورت دانستن جنس زمین‌شناسی منطقه می‌توان سرعت صحیح را حدس زد.

پس از تعیین سرعت موج در زمین، نرم افزارWin-Ekko pro طبق رابطه زیر مقاطع زمانی را به مقاطع عمقی تبدیل می‌کند.

$$D = \frac{\mathrm{VT}}{2} \qquad (۱-۴)$$

که در رابطه بالا T زمان رفت و برگشت پالس، V سرعت حرکت پالس در زمین و D عمق وقوع حادثه است [Annan, 2001].

با بررسی زمین شناسی منطقه و همچنین مشخص بودن تقریبی عمق قنات در پروفیل‌های اولیه که باعث ایجاد هذلولی‌های مشخص در این پروفیل‌ها شده و با استفاده از برازش هذلولی مدل با هذلولی ناشی از اهداف زیرسطحی، سرعت در محیط زیرسطحی برابر ۰/۱ متر بر نانوثانیه به دست آمد. با استفاده از سرعت به دست آمده مقطع عمقی داده‌های GPR شکل ۴-۱۰ حاصل شد.



شکل ۴-۱۰: مقطع عمقی پروفیل ۱ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک

قنات آب در برداشت‌های GPR همچون برداشت الکتریک در ۲۰ متری پروفیل و در عمق ۴۵ سانتیمتری خود را نشان می‌دهد که این موضوع نشان دهنده انطباق خوب این دو روش با یکدیگر در شناسایی قنات در این پروفیل است. هذلولی‌های پراش در موقعیت ۲۰ متری از پروفیل، مؤید بازتاب امواج از فصل مشترک‌های مختلف می‌باشند. از آنجایی که قسمت بالایی قنات از هوا پر

شده است و میزان اتلاف امواج GPR برای هوا بسیار پایین است با ورود امواج به قنات و گذر از بتن و هوا عمق نفوذ امواج در این قسمت زیاد می‌شود که این حالت در شکل به وضوح قابل مشاهده است. فصل مشترک‌هایی که در محل این نوع قنات‌ها می‌توان تشخیص داد عبارتند از فصل مشترک خاک-بتن، بتن-هوا، هوا-آب، آب-بتن و در نهایت بتن- خاک [Neal, 2004] . در این پروفیل به دلیل رسانندگی خاک روی قنات عمق نفوذ کاهش یافته تا جایی که تنها فصل مشترک‌های خاک-بتن، بتن-هوا و تا حدودی هوا-آب را نشان می‌دهد. توان بازتاب از فصل مشترک‌های مختلف به اندازه منطقه گذار[1] وابسته است. همان‌طور که در بخش‌های قبلی اشاره شد منطقه گذار فاصله ای است که در آن ضریب گذردهی (ε_r) تغییر کند. حال هرچه میزان این تغییر بیشتر و مرز آن ناگهانی‌تر باشد روش GPR در نمایش آن موفق تر نشان می‌دهد. مسئله دیگری که باید مورد توجه قرار گیرد، قدرت تفکیک قائم رادار در مورد این لایه ها می‌باشد. با در نظر گرفتن طیف فرکانسی امواجی که در گیرنده دریافت می‌شوند و از روی آن محاسبه فرکانس مرکزی بازگشتی، این کمیت قابل تخمین است. به عنوان مثال اگر ۰/۵ متر بالایی کانال هوا باشد، 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 با یکدیگر می‌شود. قطبیت[2] این بازتابها به علت تغییر سرعت در جهت عکس روی این مرزها، با یکدیگر متفاوت است. ولی موج بازتابیده از سطح آب بدلیل تباین شدید در گذردهی نسبی آن با هوا بزرگتر بوده و باعث می‌گردد که به عنوان پدیده غالب دیده شود. این مساله در مورد آب کاملا بالعکس بوده و سرعت پایین امواج رادار در آب احتمال آشکارسازی بتن زیر آب را با وجود عمق کم آب، سبب می‌شود.

[1] Transition Zone
[2] Polarity

در مقطع این پروفیل مشاهده می‌شود که در فواصل ۷ تا ۱۳ متری و انتهای پروفیل عمق نفوذ نسبت به محل‌های دیگر کمتر شده است. این موضوع نشان دهنده ابعاد کوچکتر دانه‌بندی ذرات و به عبارت بهتر وجود میزان رس بیشتر در این قسمت‌ها می‌باشد.

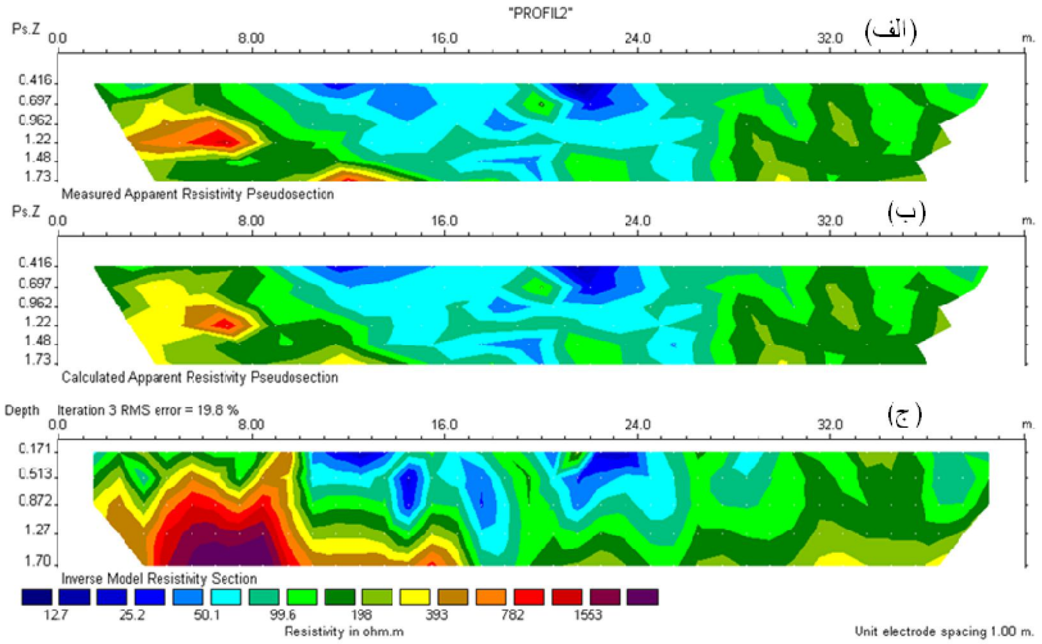
نکته دیگری که توجه را به خود جلب می‌کند عمق نفوذ کم امواج GPR در اطراف قنات است که دلیل اصلی آن نفوذ رطوبت از قنات به خاک‌های اطراف می‌باشد. این نکته در تفسیر داده‌های توموگرافی الکتریکی نیز با مقاومت ویژه کم خاک‌های این قسمت‌ها مشخص بود. در اینجا این دو روش به نوعی تایید کننده جواب یکدیگر می‌باشند و همچنین نشان دهنده هم پوشانی خوب داده‌های توموگرافی الکتریکی و GPR و مناسب بودن این دو روش به منظور تلفیق با یکدیگر است. نکته مهم دیگر را می‌توان در دو منطقه‌ای که در مقطع الکتریکی دارای افزایش مقاومت ویژه می‌باشند، مشاهده کرد. همان طور که در مقطع الکتریکی مشاهده می‌شود بر روی هر دو منطقه با مقاومت ویژه بالا، مناطقی با مقاومت ویژه بسیار پایین قرار دارند که به دلیل وجود رطوبت و یا رس در این قسمت‌ها ایجاد شده‌اند. همین وجود رس یا رطوبت باعث کاهش عمق نفوذ امواج GPR شده تا جایی که این دو مقاومت ویژه بالا در مقطع عمقی پروفیل GPR نشان داده نشده است و این خود تا حدودی مزیت برای روش توموگرافی الکتریکی در مقایسه با روش رادار نفوذی زمین (GPR) می‌باشد.

مقاومت ویژه تاثیر به سزایی در نفوذ امواج GPR درون زمین ایفا می‌کند. همان طور که از مقطع عمقی GPR در شکل ۴-۱۰ دیده می‌شود، امواج GPR پاسخی از عمق‌های بیشتر از ۱/۲ متر نشان نمی‌دهند. این مطلب ناشی از رسانندگی بالای زمین در منطقه برداشت می‌باشد. در مقایسه با این روش، روش توموگرافی الکتریکی با وجود فاصله الکتریکی کم خود هنوز هم عمق نفوذ بالاتری نسبت به روش GPR دارد. دلیل نفوذ بیشتر امواج در ۱۹/۵ متری از پروفیل عبور از ساختارهای کم اتلاف نظیر هوا و آب شیرین می‌باشد.

۴-۶-۱-۲- بررسی پروفیل ۲

پروفیل ۲ با فاصله ۴۰ متر از پروفیل اول و مانند پروفیل ۱ با فاصله الکترودی ۱ متر برداشت شد. طول پروفیل ۴۰ متر می‌باشد که قنات در حدود مرکز آن قرار دارد. عمق قنات آب در محل این پروفیل نیز همچون پروفیل ۱ در فاصله ۰/۵ تا ۱ متری می‌باشد.

مقطع مدل‌سازی شده داده‌های توموگرافی مقاومت ویژه الکتریکی این پروفیل در شکل ۴-۱۱ نشان داده شده است. این مقطع دارای نکته جالب توجهی می‌باشد. با نگاه دقیق‌تری به شبه مقطع مقاومت ویژه در شکل (الف) می‌توان تا حدودی محل قنات و عمق آن را تعیین کرد. در شبه مقطع داده‌های مقاومت ویژه قنات در عمقی بین ۰/۵ تا ۱ متر قرار دارد. اما در مدل معکوس نهایی نمایش داده شده (شکل (ج)) قنات قابل شناسایی نمی‌باشد و تنها اثری مبهم از آن مشاهده می‌شود. این نمایش ضعیف و نامشخص قنات به دو دلیل اتفاق افتاده است. یک دلیل به خاطر اثر هموارسازی مدل توسط نرم‌افزار RES2DINV می‌باشد که باعث شده تا مدل نهایی اشکال اساسی روبرو شود. دلیل دیگر در قدرت تفکیک روش توموگرافی الکتریکی برای هدف در این پروفیل می‌باشد. ابعاد قنات در حدود ۷۰×۶۰ سانتیمتر است و فاصله الکترودی ۱ متری مورد استفاده در برداشت این پروفیل، منجر به قدرت تفکیک کم برای این هدف در این قسمت شده است. در اینجا این نتیجه حاصل می‌شود که روش توموگرافی الکتریکی قدرت تفکیک کافی و لازم برای تشخیص قنات در این پروفیل را ندارد.

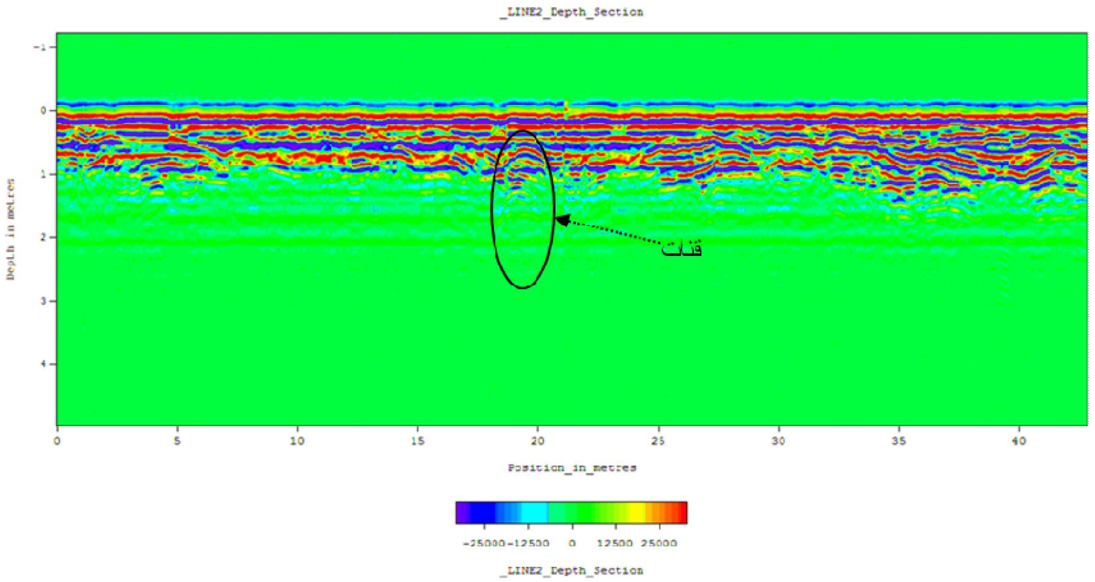


شکل ۴-۱۱: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۲ با فاصله الکترودی ۱ متر (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

مقاومت ویژه زمینه در این پروفیل مشابه پروفیل ۱ در بازه ۱۰۰ تا ۱۷۰ اهم متر قرار دارد که نشان از پوشش غالب این پروفیل به صورت آبرفت دانه متوسط با حضور رس در بعضی قسمت‌های آن دارد. در اطراف قنات به دلیل نفوذ رطوبت قنات به درون خاک مقاومت ویژه کاهش محسوسی را نشان می‌دهد. البته میزان بسیار پایین مقاومت ویژه احتمال وجود رس در این قسمت‌ها را نیز بیان می‌کند. از موقعیت ۳ تا ۱۰ متری و از عمق ۰/۸ متری افزایش مقاومت ویژه قابل مشاهده بوده که این روند افزایشی تا کف پروفیل حفظ شده است. مقدار زیاد افزایش مقاومت ویژه در این قسمت احتمال افزایش دانه‌بندی ذرات و یا حتی وجود سنگ هوازده نشده نابرجا با ابعاد متریک را نشان می‌دهد.

داده‌های برداشت GPR پروفیل ۲ در شکل ۴-۱۲ نشان داده شده است. بر روی داده‌های مقطع عمقی این پروفیل به ترتیب فیلتر DEWOW و بهره AGC با حداکثر تقویت ۳۰۰ اعمال شده

است. در مقایسه با مقطع عمقی پروفیل ۱، عمق نفوذ متوسط امواج GPR در این پروفیل بیشتر بوده و در بعضی نقاط حتی نزدیک به ۲ متر نیز می‌رسد. این نفوذ بیشتر نشان دهنده آن است که دانه‌بندی ذرات در این پروفیل بزرگتر و به عبارت بهتر میزان رس در این پروفیل کمتر از پروفیل ۱ بوده است.



شکل ۴-۱۲: مقطع عمقی پروفیل ۲ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره AGC

قنات در این پروفیل در موقعیت ۲۰ متری و در عمق ۰/۵ متری اثر خود را به وضوح نشان می‌دهد. با توجه به این نکته که قنات در مقطع مقاومت ویژه این پروفیل نمایش داده نشده است، می‌توان قدرت تفکیک به مراتب بالاتر روش رادار نسبت به روش توموگرافی الکتریکی را در این پروفیل به وضوح مشاهده نمود. از آنجایی که میزان رس و حتی رطوبت بر روی این قسمت از قنات کمتر از پروفیل ۱ بوده، تضعیف امواج رادار کاهش یافته و در نتیجه هذلولی‌های پراش نشان دهنده قنات با وضوح بیشتری مشخص شده‌اند و می‌توان فصل مشترک‌های خاک- سیمان، سیمان- هوا،

هوا- آب و تا حدودی آب- سیمان را مشاهده نمود. در نواحی اطراف قنات بر اثر نفوذ آب قنات عمق نفوذ امواج نیز کم شده است.

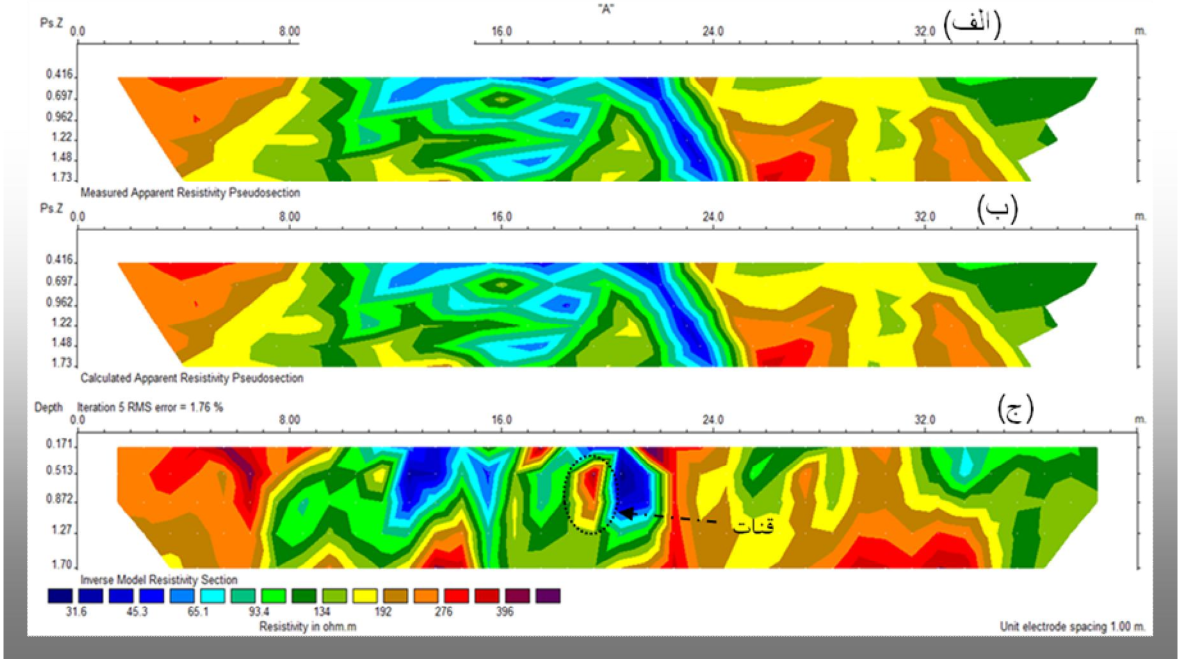
در ابتدای پروفیل نفوذ امواج GPR نسبت به قسمت‌های بعدی خود زیادتر است که دلیل آن را می‌توان در دانه درشت شدن رسوبات در این قسمت دانست. مقطع مقاومت ویژه نیز این منطقه دارای مقاومت ویژه بالا بود که آن را به افزایش دانه بندی و یا وجود سنگ هوازده نشده تفسیر کردیم. در این قسمت فقط افزایش ابعاد دانه بندی تایید شد و روش GPR نیز مانند روش توموگرافی الکتریکی نتوانست دقیقا نشان دهد که این افزایش مقاومت ویژه متعلق به وجود حفرات هوا می‌باشد یا ناشی از وجود سنگ هوازده نشده با ابعاد متریک و یا حتی در اثر افزایش ابعاد ذرات در حد شن و ماسه می‌باشد. در انتهای پروفیل GPR و از فاصله ۳۳ متری به بعد نیز عمق نفوذ افزایش یافته است که دلیل آن را می‌توان در تغییر دانه بندی به سمت ابعاد بزرگتر (کاهش میزان رس و افزایش شن و ماسه) دانست. در مقطع توموگرافی الکتریکی نیز این قسمت از سطح تا عمق مقاومت ویژه یکنواختی بالاتر از حد زمینه را نشان می‌دهد که به صورت تدریجی و یکنواخت این مقاومت ویژه به سمت عمق افزایش می‌یابد. در این ۲ قسمت هم پوشانی خوبی بین مقاطع مقاومت ویژه و GPR وجود دارد.

از تلفیق و مقایسه دو روش توموگرافی الکتریکی و GPR در این پروفیل نتایج جالبی حاصل شد. اول اینکه قدرت تفکیک روش GPR در شناسایی این قسمت از قنات به مراتب بیشتر از روش توموگرافی الکتریکی است. همچنین هر دو روش نفوذ رطوبت از قنات به اطراف را به خوبی نمایش می‌دهند. و در نهایت دانه بندی ذرات و میزان رس در هر دو روش به طریقی مختص به خود آن روش نشان داده شده است.

۴-۶-۱-۳- تفسیر پروفیل ۳

این پروفیل به فاصله ۴۰ متری از پروفیل شماره ۲ و ۲۹/۵ متری از محل تغییر جهت قنات قرار دارد. طول این پروفیل مانند دو پروفیل قبلی ۴۰ متر بوده که برداشت الکتریک آن با فاصله الکترودی ۱ متر انجام گرفت.

مقطع الکتریک این پروفیل در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است، قنات در محل ۱۹ تا ۲۰ متری پروفیل و در عمق ۰/۴ تا ۱ متر قرار دارد و با بازه مقاومت ویژه ۵۰۰ – ۲۰۰ اهم متر مشخص شده است. همان طور از مدل معکوس نشان داده شده در شکل (ج) می‌توان فهمید، این مقطع دارای یک روند خاص مقاومت ویژه نمی‌باشد و نمی‌توان مانند پروفیل‌های قبلی مقدار زمینه مقاومت ویژه معینی برای آن تعیین کرد. کاهش مقاومت ویژه ناشی از نفوذ آب در دو طرف قنات به صورت مشابه نبوده و با توجه به تغییرات مقاومت ویژه در اطراف قنات می‌توان گفت که در سمت راست میزان نفوذ آب بیشتر از سمت چپ است. از این نکته می‌توان چنین استنباط کرد که خاک‌های سمت راست قنات نسبت به سمت چپ آن نفوذپذیرتر می‌باشند.

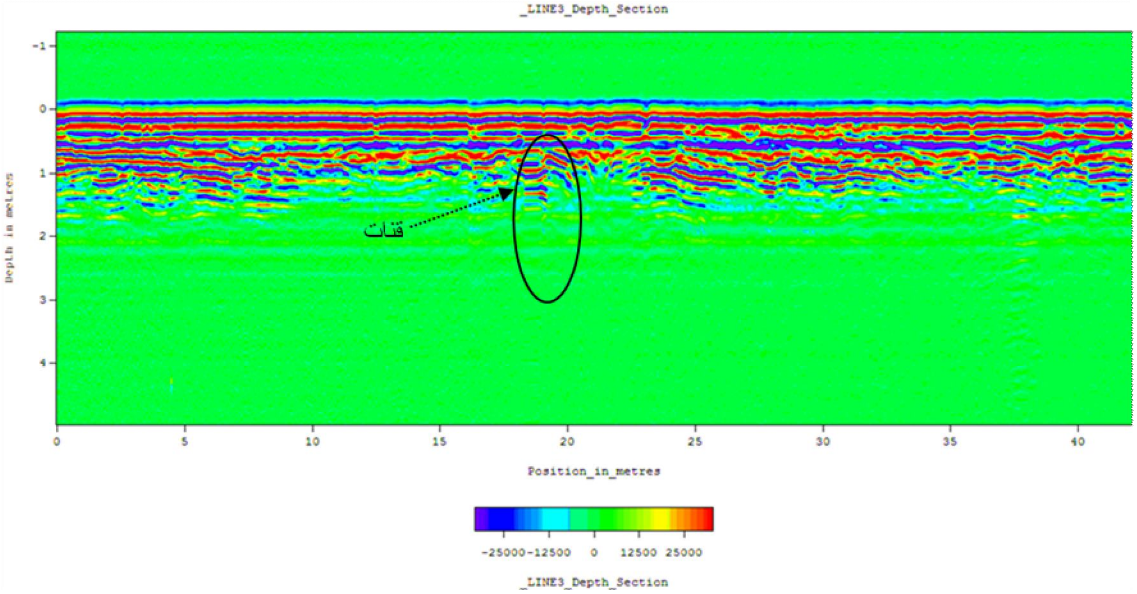


شکل ۴-۱۳: شبه مقطع و مقطع حاصل ازمدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۳با فاصله الکترودی ۱ متر (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در بعضی از قسمت‌های این پروفیل مانند ابتدای پروفیل تا ۹ متری و همچنین در موقعیت ۲۷ تا ۳۴ متری پروفیل افزایش مقاومت ویژه مشاهده می‌شود. البته از آنجایی که این میزان افزایش زیاد نبوده و حداکثر به ۵۰۰ اهم متر می‌رسد، می‌توان افزایش مقاومت ویژه در این محل‌ها را کاهش میزان رس و افزایش ابعاد ذرات و وجود شن و ماسه تفسیر کرد. در فاصله ۱۲ تا ۱۴ متری پروفیل و در عمق کم نیز مقاومت ویژه پایینی مشاهده می‌شود که در بازبینی منطقه در این قسمت رس مشاهده گردید.

مقطع GPR پروفیل ۳ نیز در شکل ۴-۱۴ قابل مشاهده می‌باشد. در این پروفیل بر روی داده‌ها فیلتر DEWOW و بهره AGC با حداکثر تقویت ۵۰۰ اعمال شده است. موقعیت قنات در این

مقطع هم‌خوانی خوبی با داده‌های مقاومت ویژه دارد. بطوریکه قنات در قبل از ۲۰ متری پروفیل و از عمق ۰/۵ متر شروع می‌شود.



شکل ۴-۱۴: مقطع عمقی پروفیل ۳ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره AGC

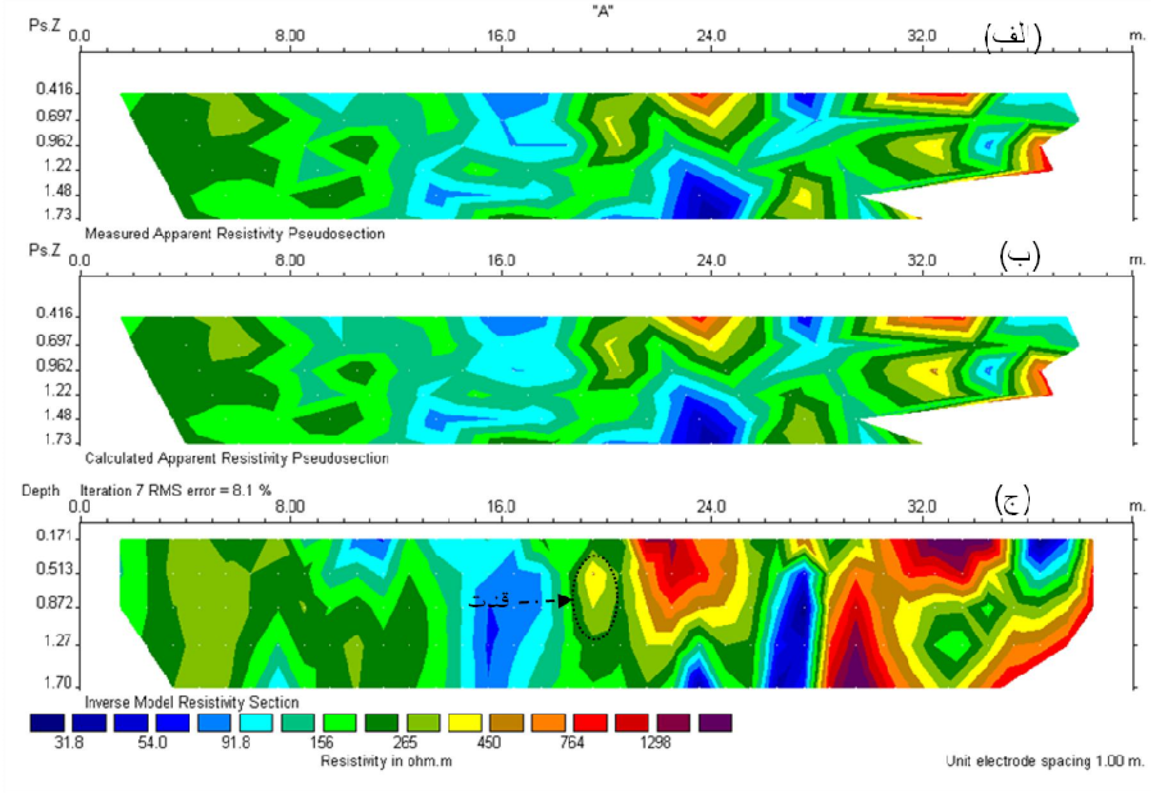
در اطراف قنات عمق نفوذ امواج رادار در سمت راست کمتر از سمت چپ می‌باشد و این نکته نشان دهنده نفوذ بیشتر آب در سمت راست قنات است. این نتیجه گیری در داده‌های مقاومت ویژه نیز دقیقا به دست آمد. نکته دیگر عمق نفوذ بالای GPR در ابتدای پروفیل بوده که تا حدود ۲ متر می‌رسد و نشان دهنده دانه‌بندی بزرگتر ذرات و کمتر بودن میزان رس در این قسمت است. همین تفسیر در همین بخش در مقطع مقاومت ویژه نیز تکرار شده بود. در فاصله ۲۴ تا ۳۳ متری نیز عمق نفوذ امواج GPR نسبتا بالا می‌باشد.

۴-۶-۲- تفسیر پروفیل‌های عمود بر قنات در بخش دوم

در این بخش پروفیل‌های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ عمود بر مسیر جدید قنا ت برداشت شدند. برعکس پروفیل‌های بخش اول که عمق آب در آنها تقریبا ثابت بوه است، در این بخش با حرکت به سمت پروفیل‌های انتهایی عمق آب نیز افزایش می‌یابد. نکته دیگر مربوط به پروفیل‌های ۴ و ۵ می‌شود که نیمه اول این دو پروفیل بر روی زمین‌های کشاورزی برداشت شده است.

۴-۶-۲-۱- تفسیر پروفیل ۴

این پروفیل ۱۶ متر بالاتر از نقطه تغییر جهت قنات قرار دارد. مقطع مقاومت ویژه این پروفیل در شکل ۴-۱۵ مشاهده می‌شود. نیمه اول این پروفیل همان طور که ذکر شد بر روی زمین کشاورزی برداشت شده است. داده‌های نیمه اول این پروفیل نیز نشان دهنده به هم ریختگی در لایه بندی زمین در این قسمت بوده و بازه مقاومت ویژه ۲۵۰ – ۱۴۰ اهم متری نشان از آن دارد که زمین کشاورزی در این پروفیل از آبرفت‌های دانه متوسط تشکیل شده است.



شکل ۴-۱۵: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۴ با فاصله الکترودی ۱ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در نیمه دوم پروفیل نیز که خارج از محدوده زمین‌های کشاورزی برداشت شد، افزایش مقاومت ویژه به سادگی قابل تشخیص است. این افزایش مقاومت ویژه نشان از افزایش ابعاد ذرات در این قسمت و هوازدگی کمتر خاک‌های زیرسطحی این بخش نسبت به زمین کشاورزی دارد. البته در اینجا تغییرات مقاومت ویژه نیز شدیدتر می‌شود.

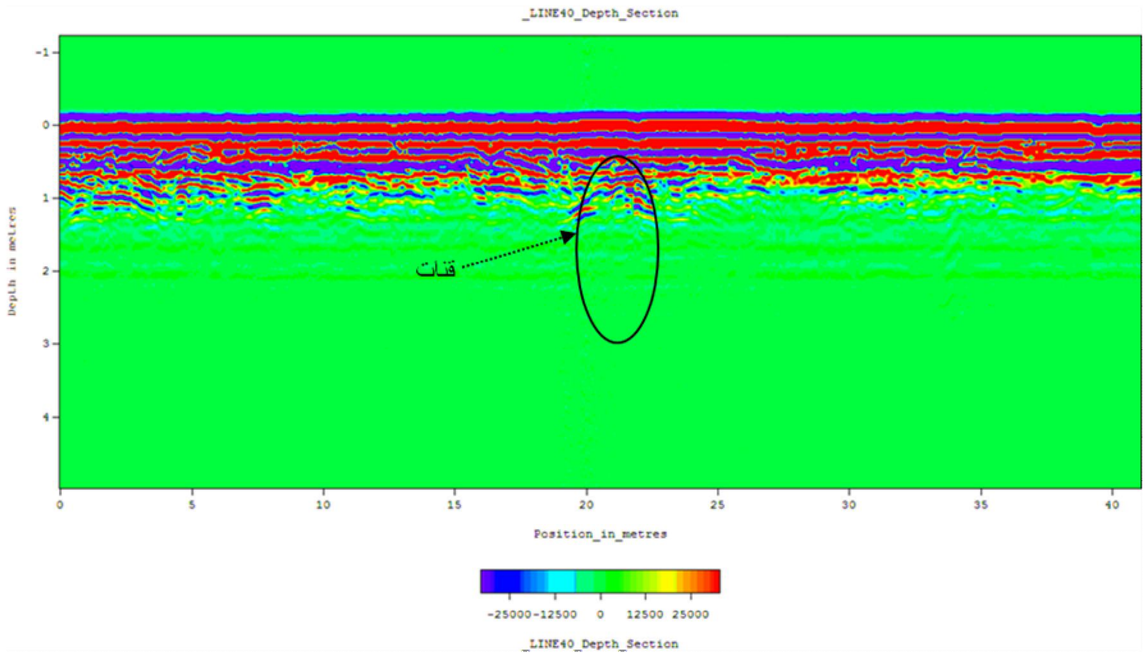
بر اساس مقطع مقاومت ویژه، قنات مورد بررسی در موقعیت ۱۹ تا ۲۰ متری و در عمق ۱ – ۰/۵ متری با مقاومت ویژه ۴۵۰ -۲۶۰ اهم متر قرار دارد. عدم افت مقاومت ویژه در اطراف قنات نشان می‌دهد که در این پروفیل نفوذ آب از قنات به زمین‌های اطراف ناچیز و یا بسیار کم بوده است.

در این پروفیل و پروفیل بعدی در مجاورت قنات یک لایه سیمانی بر روی زمین کشیده شده بود که در مقطع مدل‌سازی این پروفیل نیز به وضوح در موقعیت ۲۱ تا ۲۳ متری با مقاومت ویژه بالا مشخص شده است. در فاصله ۳۱ تا ۳۴ متری نیز مقاومت ویژه بالای مشاهده شده به دلیل وجود جاده خاکی در این قسمت است.

شکل ۴-۱۶ مقطع داده‌های رادار برای پروفیل ۴ را نشان می‌دهد. بر روی این پروفیل فیلتر DEWOW و بهره ثابت[1] ۲۰۰ را اعمال کرده‌ایم.

با وجود اینکه قنات با توجه به مشاهدات صحرایی در فاصله ۱۹ تا ۲۰ متری پروفیل قرار دارد، اما در اینجا موقعیت قنات در بعد از ۲۰ متر نشان داده شده است. دلیل این اتفاق را می‌توان این گونه بیان کرد که در برداشت پروفیل GPR یک سنسور به چرخ گاری حمل کننده دستگاه متصل است. با چرخش این چرخ و داشتن قطر چرخ، دستگاه به طور خودکار مسیر طی شده را محاسبه می‌کند. حال اگر بر اثر عواملی چون توپوگرافی زمین، وجود بوته‌های خار و گیاهان صحرایی و یا عدم برداشت صحیح، در میزان چرخش این چرخ اختلالی بوجود آید، بازتاب‌های زیرسطحی در موقعیت دیگری برای پروفیل ثبت می‌شود. این حادثه در این پروفیل رخ داده است. وجود زمین کشاورزی شخم زده شده در نیمه ابتدایی پروفیل و تاثیر آن بر میزان چرخش چرخ گاری حمل کننده دستگاه GPR باعث شده تا موقعیت قنات با یک متر فاصله از موقعیت حقیقی خود نشان داده شود. عمق نشان دادن اثر قنات در این پروفیل از ۶۰ سانتیمتری شروع می‌شود. وسیع نشان داده شدن محدوده قنات به وسیله داده‌های GPR در این پروفیل احتمالا به دلیل چرخش زیاد گاری حمل کننده دستگاه GPR بر روی قنات به علت برداشت بد می‌باشد.

[1] Constant

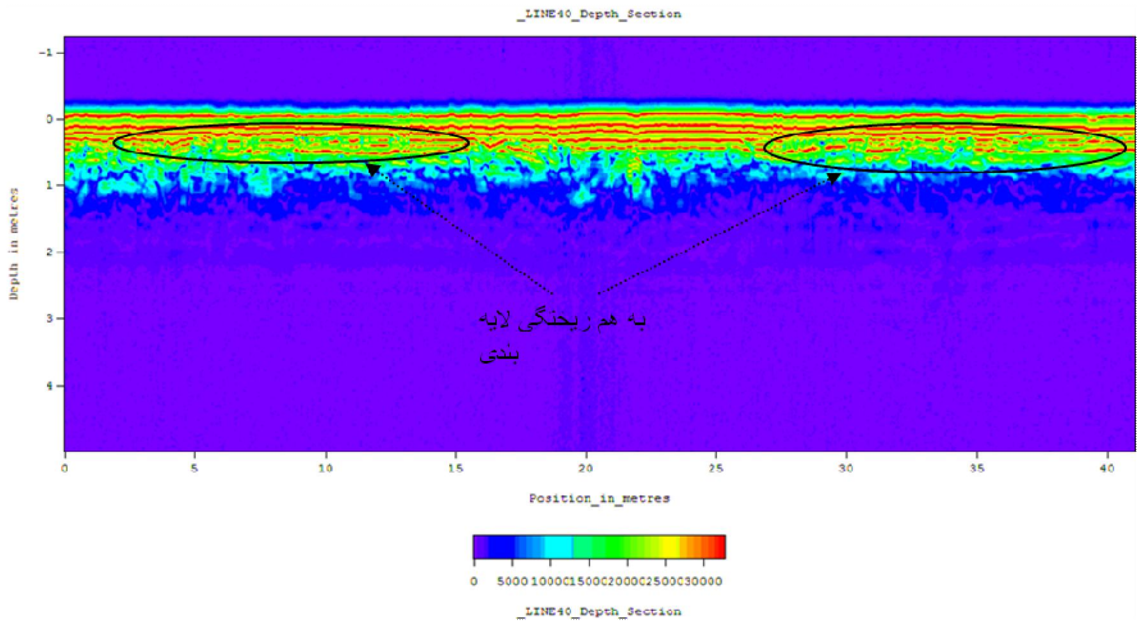


شکل ۴-۱۶: مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره Constant

در این پروفیل عمق نفوذ نیمه ابتدایی پروفیل بیشتر از نیمه دوم می‌باشد و این عمق نفوذ بیشتر نشان از رسانندگی کمتر لایه‌های زیرسطحی در نیمه اول نسبت به نیمه دوم پروفیل دارد. با توجه به تفسیر مقاومت ویژه که میزان رس را در نیمه دوم پروفیل کمتر از نیمه ابتدایی پروفیل نشان می‌داد، بین تفسیر توموگرافی الکتریکی و GPR تضاد به وجود می‌آید. این تضاد در تفسیر به دلیل آن می‌باشد که در بخش اول به دلیل شخم زدن زمین، لایه‌های زیرسطحی جابجا شده و در نتیجه رطوبت خاک، که از عوامل موثر بر نفوذ امواج GPR می‌باشد، در نیمه اول به مراتب کمتر از نیمه دوم پروفیل است. این میزان کمتر رطوبت در نیمه اول عمق نفوذ بیشتر امواج رادار را نتیجه شده است.

عمق نفوذ امواج در اطراف قنات همچنان زیاد است و این تایید کننده نتایج مقاومت ویژه مبنی بر نفوذ ناچیز و یا بسیار کم رطوبت از قنات به زمین‌های اطراف می‌باشد.

جهت شناسایی لایه بندی زیرسطحی در زمین کشاورزی در این پروفیل و شناسایی اثر شخم زدن بر روی این لایه‌ها یکبار دیگر بر روی داده‌های رادار این قسمت فیلتر DEWOW، بهره اتوماتیک . مشخصه Envelope را اعمال کرده تا بتوان لایه بندی زیرسطحی را برای این پروفیل بررسی کرد. مقطع حاصل از اعمال این پردازش‌ها در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷: مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک و مشخصه Envelope

در این شکل مشخصا به هم خوردگی لایه‌های زیرسطحی در ابتدای پروفیل و در محل زمین کشاورزی مشاهده می‌شود که با تفسیر مقطع مقاومت ویژه هم‌خوانی خوبی دارد. در انتهای این پروفیل نیز مانند ابتدای پروفیل به هم خوردگی لایه‌های زیرسطحی مشاهده می‌شود که در بازدید مجدد از منطقه مشخص شد که در این قسمت نیز زمین کشاورزی وجود دارد که در زمان برداشت داده‌های توموگرافی الکتریکی و GPR این زمین‌ها بایر بود.

۴-۶-۲- ۲- تفسیر پروفیل ۵

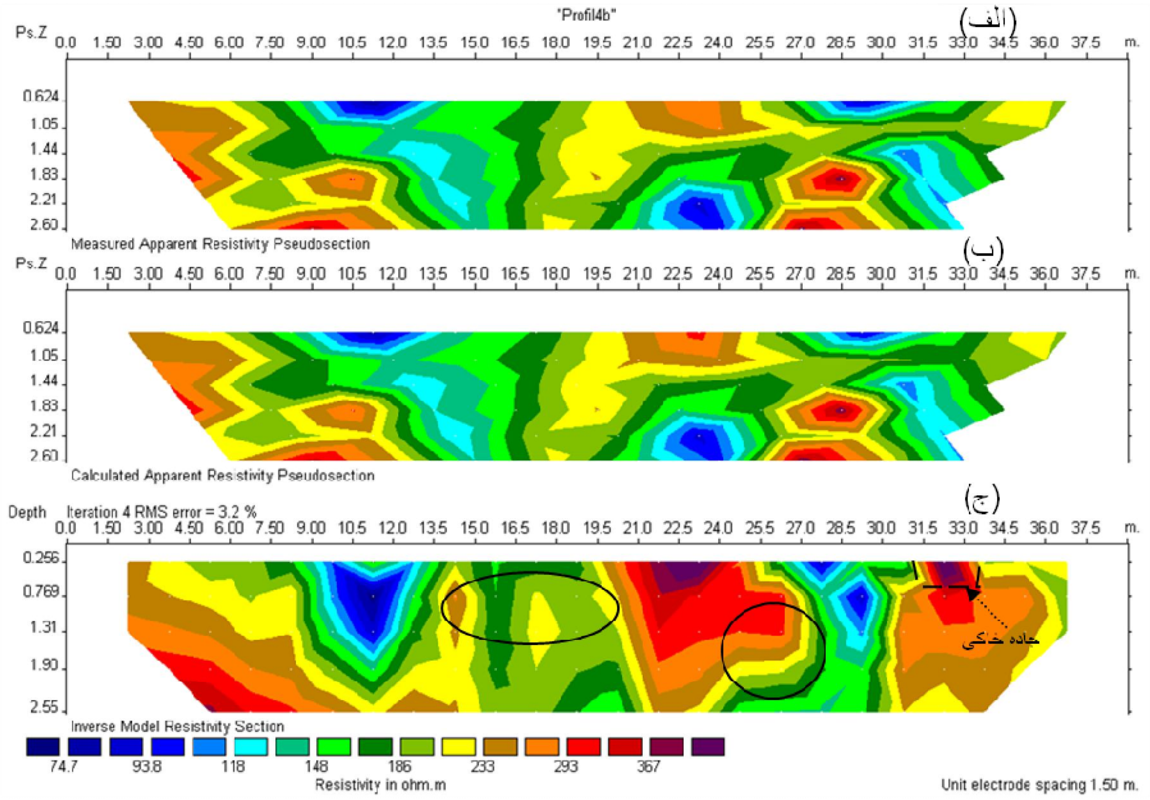
با افزایش عمق قنات در پروفیل‌های آخر، پروفیل‌های ۵، ۶ و ۷ با دو فاصله الکترودی برداشت گردید. فاصله الکترودی کوچک‌تر به منظور داشتن قدرت تفکیک بالاتر و مقایسه با داده‌های رادار مربوط به عمق کم و فاصله الکترودی بزرگتر برای بررسی دقیق‌تر و پوشش عمقی بهتر قنات برداشت شد.

به طور کلی در فواصل الکترودی کوچکتر قدرت تفکیک برداشت‌های مقاومت ویژه بیشتر بوده و تغییرات زیرسطحی کم عمق با وضوح بهتری مشاهده می‌شود، در حالیکه با افزایش فاصله الکترودی قدرت تفکیک کاهش یافته ولی در عین حال عمق نفوذ افزایش می‌یابد.

پروفیل شماره ۵ در فاصله ۳۵ متری از پروفیل ۴ و با دو فاصله الکترودی ۱/۵ و ۲ متر برداشت شد. طول پروفیل برای فاصله الکترودی ۱/۵ متری برابر با ۳۹ متر و و برای فاصله الکترودی ۲ متر دارای طولی معادل با ۴۰ متر می‌باشد. در مورد این برداشت‌ها باید گفت که سعی شده تا قنات منطبق بر مرکز پروفیل باشد و در حقیقت نقطه ۱۹/۵ متری پروفیل با فاصله الکترودی ۱/۵ متر منطبق بر نقطه ۲۰ متری پروفیل با فاصله الکترودی ۲ متر است، به عبارت دیگر نقطه آغاز پروفیل دوم ۰/۵ متر عقب تر از نقطه شروع پروفیل اول قرار دارد. نکته دیگر در مورد این پروفیل این است که مانند پروفیل ۴ نیمه اول این پروفیل در زمین کشاورزی برداشت شد.

شکل ۴-۱۸ مقطع مدل سازی شده پروفیل ۵ را با فاصله الکترودی ۱/۵ متر نشان می‌دهد. در نیمه اول این پروفیل در عمق کم اثرات تداخل مقاومت ویژه مشاهده می‌شود، البته این میزان به هم ریختگی به اندازه پروفیل ۴ نمی‌باشد. نکته دیگر این پروفیل عدم توانایی در نشان دادن واضح قنات است. البته در موقعیت ۱۹/۵ متری و در عمق‌های انتهایی مورد بررسی این پروفیل به صورت

مبهم می‌توان بخش سبز رنگ نمایش داده شده با مقاومت ویژه حدودی ۱۵۰ اهم متر را قسمت بالایی قنات تفسیر نمود، اما عدم تباین کافی بین مرزهای این منحنی با محیط اطراف و همچنین کمتر بودن مقاومت ویژه این بخش نسبت به مقاومت ویژه قنات در پروفیل‌های قبلی باعث ایجاد ابهام در تفسیر می‌شود. البته دلیل کمتر بودن مقاومت ویژه در این بخش از قنات نسبت به جاهای دیگر قنات در پروفیل‌های دیگر را می‌توان به دلیل کم بودن سطح مقطع قنات در این قسمت دانست که باعث شده تا نسبت بیشتری از قنات توسط آب پر شود.

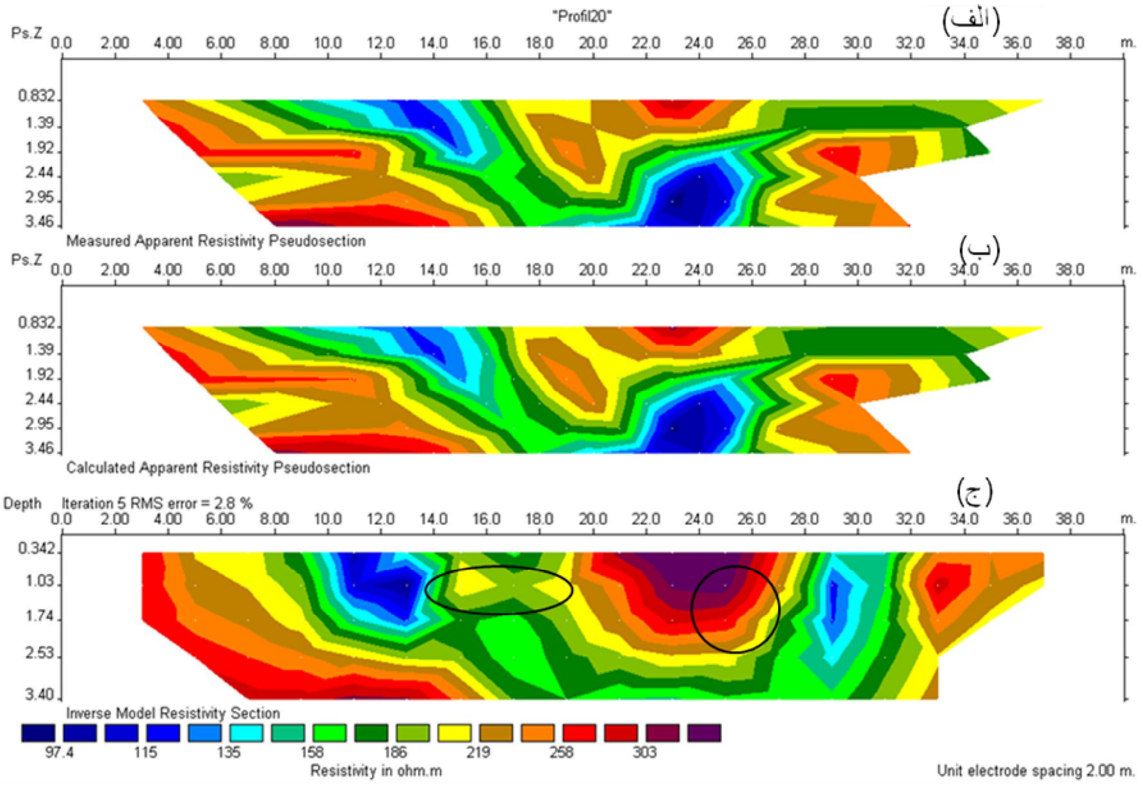


شکل ۴-۱۸: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۵ با فاصله الکترودی برداشت ۱/۵ متر (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در بعضی قسمت‌ها افزایش مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که با توجه به افزایش نه چندان زیاد آن می‌توان افزایش ابعاد ذرات و تبدیل ذرات از رس به شن و ماسه را در این محل‌ها انتظار داشت. یک لایه سیمانی از فاصله ۲۰ تا ۲۴ متری این پروفیل بر روی زمین مشاهده شد که بر روی مقطع حاصل از مدل‌سازی این پروفیل نیز مشخص می‌باشد.

در این مقطع و در موقعیت ۳۰ متری تباین مشخصی در مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که در نگاه اول احتمال وجود گسل را در این قسمت نشان می‌دهد. مشاهدات منطقه‌ای نشانه‌ای از وجود گسل در این محل را نشان نداد. وجود جاده خاکی در فاصله ۳۵-۳۱ متری این پروفیل نیز می‌تواند باعث ایجاد این تباین شده باشد.

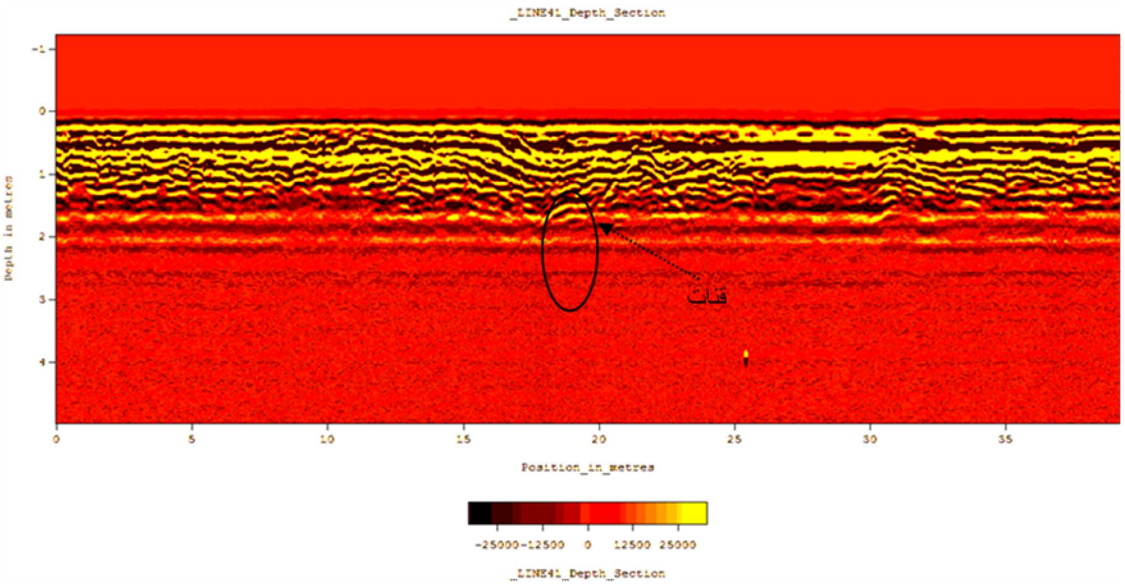
مقطع پروفیل ۵ با فاصله الکترودی ۲ متر در شکل ۴-۱۹ آورده شده است.در این پروفیل افزایش عمق نفوذ تا ۳/۴۰ متر مشهود می‌باشد، اما قدرت تفکیک در شناسایی قنات به صورت محسوسی کاهش یافته تا جایی که اثر مبهمی که در مقطع شکل ۴-۱۸ محل قنات تفسیر شده بود در این مقطع حذف شده است.



شکل ۴-۱۹: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۵ با فاصله الکترودی برداشت ۲ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در این مقطع لایه بندی و توزیع مقاومت ویژه دارای انطباق خوبی با شکل ۴-۱۷، که مقطع مقاومت ویژه این پروفیل با فاصله الکترودی کمتر را نشان می‌دهد، می‌باشد. البته در بعضی قسمت‌ها اختلاف‌های کوچکی بین این دو مقطع وجود دارد که برخی از آنها در شکل مشخص شده است. دلیل این اختلاف‌ها را می‌توان در تفاوت قدرت تفکیک این دو مدل به واسطه فاصله الکترودی گوناگون دانست.

مقطع رادار این پروفیل نیز در شکل ۴-۲۰ آورده شده است. بر روی داده‌های رادار این پروفیل فیلتر DEWOW، تقویت از نوع SEC با میزان افت ۱۸، مقدار آغازی ۱ و حداکثر تقویت ۱۵۰۰ اعمال شده است. به دلیل اینکه بر روی محل قنات تپه کوچکی ساخته شده بود بر روی این پروفیل تصحیح توپوگرافی نیز اعمال شد.



شکل ۴-۲۰: مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره SEC و تصحیح توپوگرافی

به دلیل افزایش عمق قنات در این پروفیل، تنها قسمت کوچکی از امواج مرز بالای قنات را در این پروفیل پوشش می‌دهند. در نتیجه مرز بالایی قنات در موقعیت ۲۰ متری و عمق ۱/۵ متر مشخص شده است.

با شناسایی قنات توسط داده‌های رادار مشخص می‌شود که تفسیر انجام گرفته درباره تعیین موقعیت قنات بر روی داده‌های مقاومت ویژه این پروفیل در شکل ۴-۱۸ درست بوده و داده‌های رادار

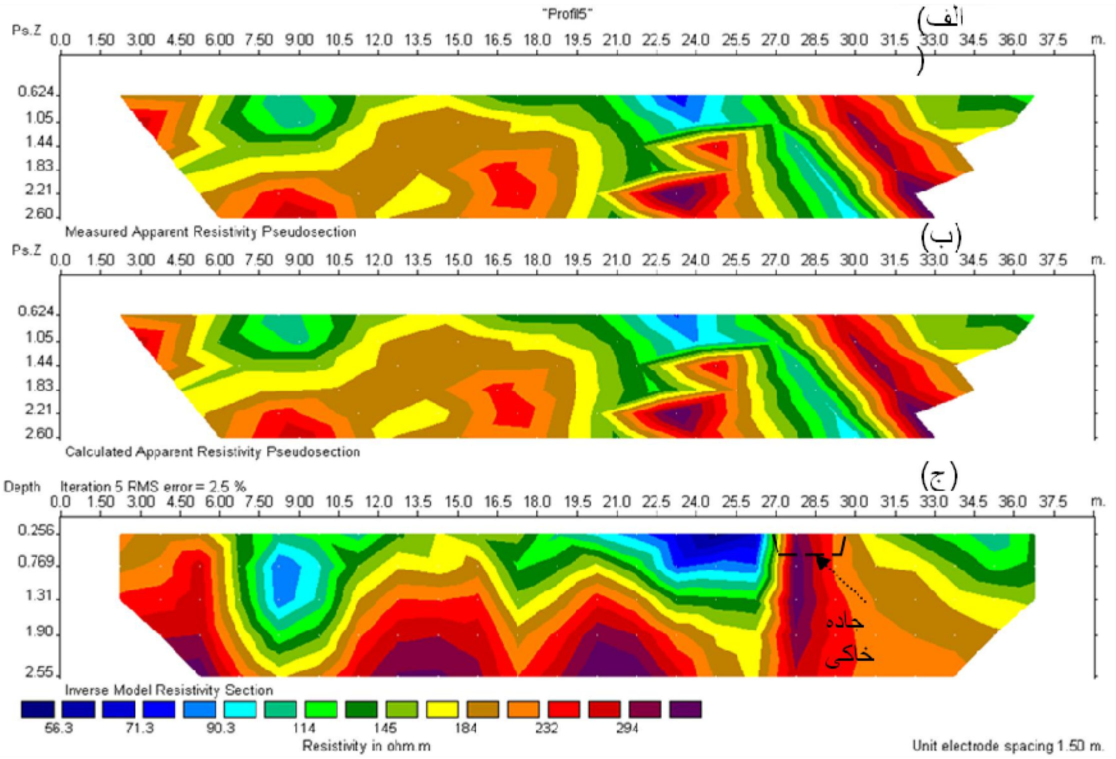
در این پروفیل تایید کننده نتایج مقطع مقاومت ویژه می‌باشد. همچنین در داده‌های رادار به هم ریختگی لایه بندی در نیمه اول این پروفیل مشهود است که دلیل آن وجود زمین کشاورزی در این قسمت می‌باشد. در این مقطع و در فاصله ۲۰ تا ۲۳ متری و در عمق ۰/۵ متری این پروفیل روندی شبیه به هذلولی مشاهده می‌شود. دلیل این شکل و همچنین به هم ریختگی لایه بندی بر روی قنات را باید به احتمال جابجایی خاک‌های این قسمت به دلیل حفر قنات نسبت داد. با این حال برای اطمینان نیاز به حفاری در این قسمت احساس می‌شود و داده‌های GPR نمی‌تواند جواب حتمی را ارائه دهد. موقعیت ۳۰ متری پروفیل نیز که در داده‌های مقاومت ویژه شکل ۴-۱۸ با تباین مشهودی وجود داشت در اینجا نیز تا حدودی مشخص می‌باشد.

۴-۶-۲- ۳- تفسیر پروفیل ۶

این پروفیل مانند پروفیل ۵ با دو فاصله الکترودی ۱/۵ و ۲ متر برداشت شد. در حدود ۷/۶۰ متر پایین‌تر از مرکز این پروفیل عمق آب قابل اندازه گیری بود که با اندازه گیری سطح آب مشخص شد آب در عمق ۲/۸۵ متری قرار دارد.

شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده‌های مقاومت ویژه این پروفیل با فاصله الکترودی ۱/۵ متر در شکل ۴-۲۱ به نمایش درآمده است. در این پروفیل توزیع مقاومت ویژه به صورت منظم و شبه لایه‌ای مشاهده می‌شود و نیز قنات در فاصله ۱۹/۵ تا ۲۱ متری با تغییرات مقاومت ویژه از ۲۳۰ تا ۴۰۰ اهم متر به وضوح مشخص است. اثرات قنات بر روی این مقطع مقاومت ویژه از عمق ۱/۸ متری آغاز می‌شود و تا حداکثر عمق بررسی این پروفیل ادامه دارد. در موقعیت ۱۳/۵ متری این پروفیل نیز یک افزایش مقاومت ویژه بسیار مشابه با اثرات قنات مشاهده می‌شود که

می‌توان احتمال وجود ذرات دانه درشت مانند شن و ماسه و یا حفرات کوچک حاوی آب را به آن نسبت داد.



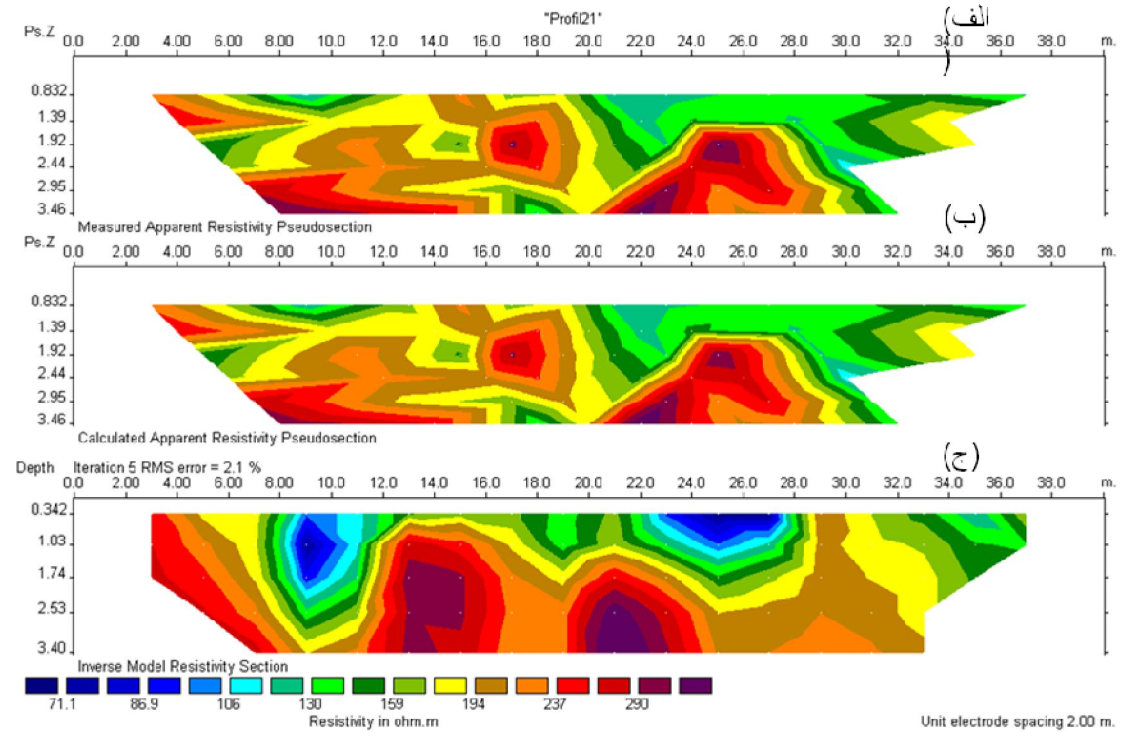
شکل ۴-۲۱: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۶ با فاصله الکترودی برداشت ۱.۵ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در فاصله ۲۷ تا ۳۰ متری این پروفیل یک افزایش مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که در جهت عمق ادامه دارد. این محل بر جاده خاکی که پروفیل آن را قطع کرده منطبق بوده و به خوبی توسط مقطع مقاومت ویژه با فاصله الکترودی ۱/۵ متر مشخص شده است. مقدار زمینه مقاومت ویژه

در این پروفیل در بازه تغییرات ۲۰۰ – ۱۰۰ اهم متر مشاهده می‌شود که بیانگر وجود آبرفت های دانه متوسط در این پروفیل در قالب زمینه می‌باشد.

در این پروفیل تنها قسمت‌های بالایی قنات مشخص می‌شود و عمق نفوذ تا حدی نیست که بتواند قنات را به طور کامل پوشش بدهد.

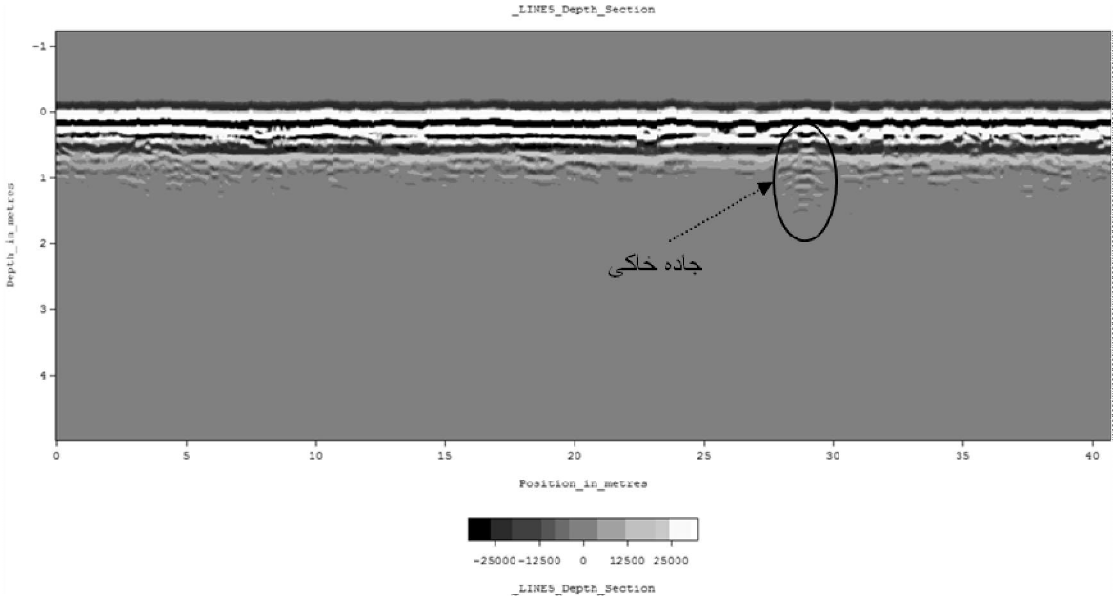
شکل ۴-۲۲ مقطع مدل‌سازی پروفیل ۶ با فاصله الکترودی ۲ متر را نشان می‌دهد. در این مقطع نیز بازه مقاومت ویژه زمینه، محل قنات، موقعیت محل افزایش مقاومت ویژه مشابه با قنات و میزان افزایش مقاومت ویژه در محل قنات انطباق خوبی با مقطع مقاومت ویژه به دست آمده با فاصله الکترودی ۱/۵ متر دارند.



شکل ۴-۲۲: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۶ با فاصله الکترودی برداشت ۲ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در این مدل سطح بیشتر و واضح تری از قنات به دلیل عمق نفوذ بیشتر مشخص می‌شود که این مزیت افزایش فاصله الکترودی در این پروفیل است. اما موقعیت جاده خاکی که در برداشت‌های با فاصله الکترودی ۱/۵ متر به وضوح مشخص بود، به دلیل کاهش قدرت تفکیک بر اثر افزایش فاصله الکترودی، به مراتب وضوح خود از دست داده است.

شکل ۴-۲۳ مقطع عمقی داده‌های رادار برای پروفیل ۶ می‌باشد که با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک به دست آمده است. در این پروفیل عمق نفوذ کم برای امواج رادار نشان دهنده ریزدانه بودن لایه‌های زیرسطحی و یا وجود رطوبت در خاک در زمان برداشت می‌باشد. این تفسیر در تضاد با تفسیر الکتریک است که زمینه پروفیل را آبرفت دانه متوسط نشان می‌داد. عمق نفوذ کم رادار در این پروفیل باعث شده تا هیچ اثری از قنات در این پروفیل دیده نشود و درنتیجه برداشت توموگرافی الکتریکی به منظور شناسایی قنات در این پروفیل کاملا موفق‌تر از برداشت رادار عمل کرده است. نکته دیگر در فاصله پروفیل ۲۸ تا ۳۰ متری پروفیل است که عمق نوذ افزایش یافته و در شکل نیز مشخص شده است. این محل منطبق بر جاده خاکی می‌باشد که ابعاد رسوبات زیرسطحی در زیر آن به دلیل عبور وسائل نقلیه افزایش یافته است و به وسیله داده‌های رادار کاملا مشخص می‌باشد.



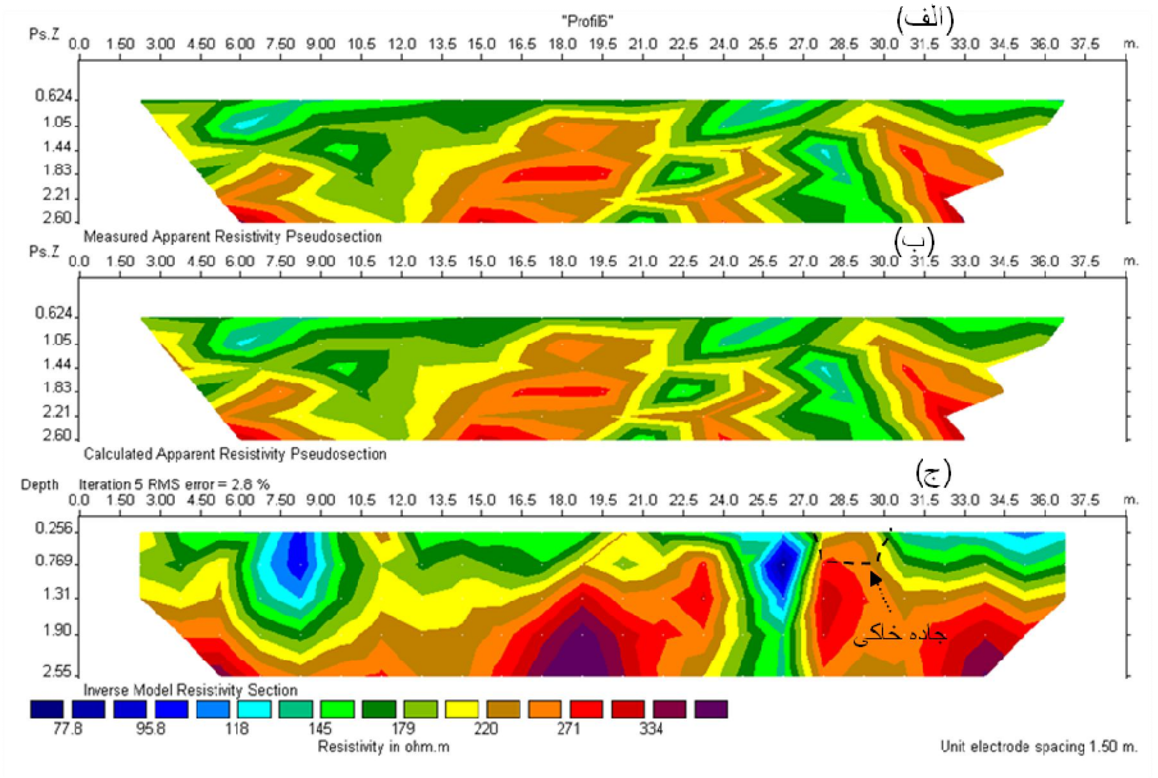
شکل ۴-۲۳: مقطع عمقی پروفیل ۶ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک که محل جاده خاکی در آن مشخص شده است

۴-۶-۲- ۴- تفسیر پروفیل ۷

این پروفیل با دو فاصله الکترودی ۱/۵ و ۲/۵ متری برداشت شده است. به دلیل افزایش عمق قنات برداشت دوم این پروفیل با فاصله الکترودی ۲/۵ متر برداشت گردید.

شکل ۴-۲۴ شبه مقطع و مقطع مدل‌سازی پروفیل ۷ را با فاصله الکترودی ۱/۵ متر نشان می‌دهد. عمق بررسی این پروفیل با فاصله الکترودی ۱/۵ متری برابر با ۲/۵۵ متر می‌باشد. در این مقطع مرکز قنات دارای مقاومت ویژه‌ای در حدود ۳۰۰ تا ۴۵۰ اهم متر بوده که نیمه بالایی آن در این پروفیل به وضوح در موقعیت ۱۹ متری از ابتدای پروفیل قابل مشاهده است.

همان طور که مشاهده می‌شود قنات در دو پروفیل ۶ و ۷ علی‌رغم افزایش عمق حتی با فاصله الکترودی بزرگتر نیز، که قدرت تفکیک کمتری دارد، قابل تشخیص است. دلیل این وضوح خوب قنات در پروفیل‌های انتهایی، افزایش سطح مقطع قنات با فاصله گرفتن از مظهر آن است.

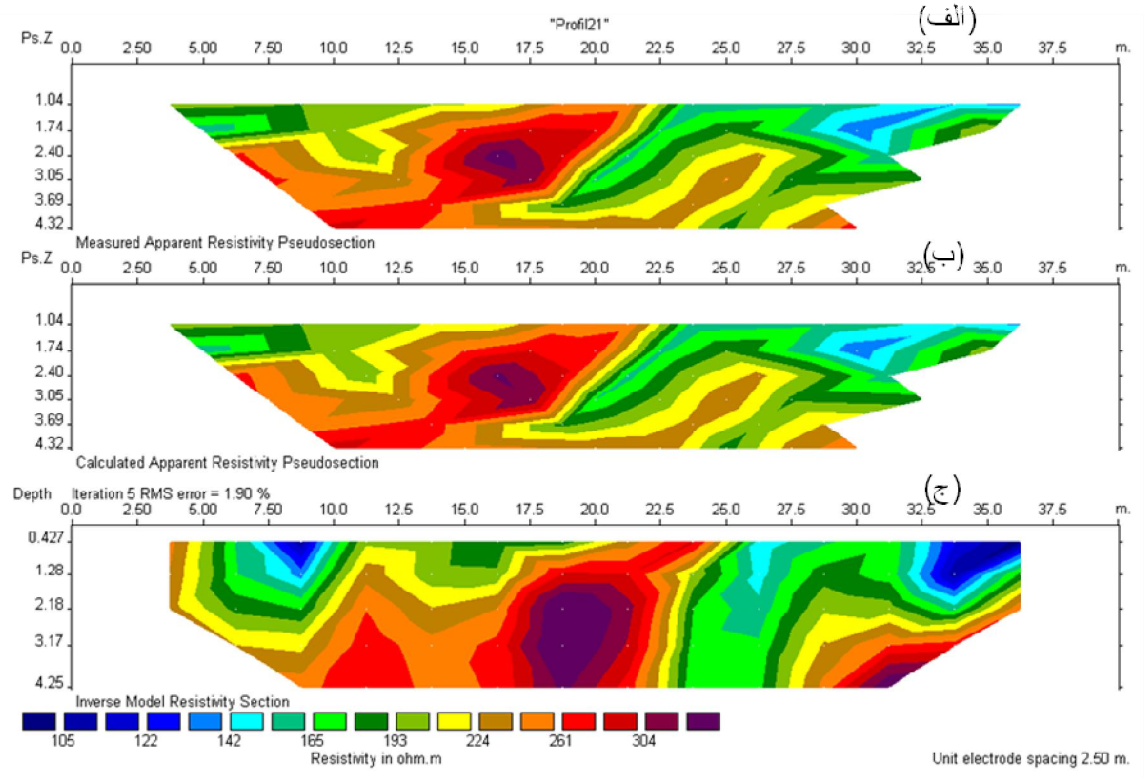


شکل ۴-۲۴: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۷ با فاصله الکترودی برداشت ۱/۵ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

مقاومت ویژه زمینه این پروفیل در بازه ۲۲۰ – ۱۴۰ اهم متر است که نشان از تسلط لایه بندی زیرسطحی به صورت آبرفت‌های دانه متوسط دارد. نکته دیگر تغییرات کم مقاومت ویژه در کل

این پروفیل است که از این تغییرات کم می‌توان به یکنواخت بودن نسبی رسوبات در طول پروفیل پی برد.

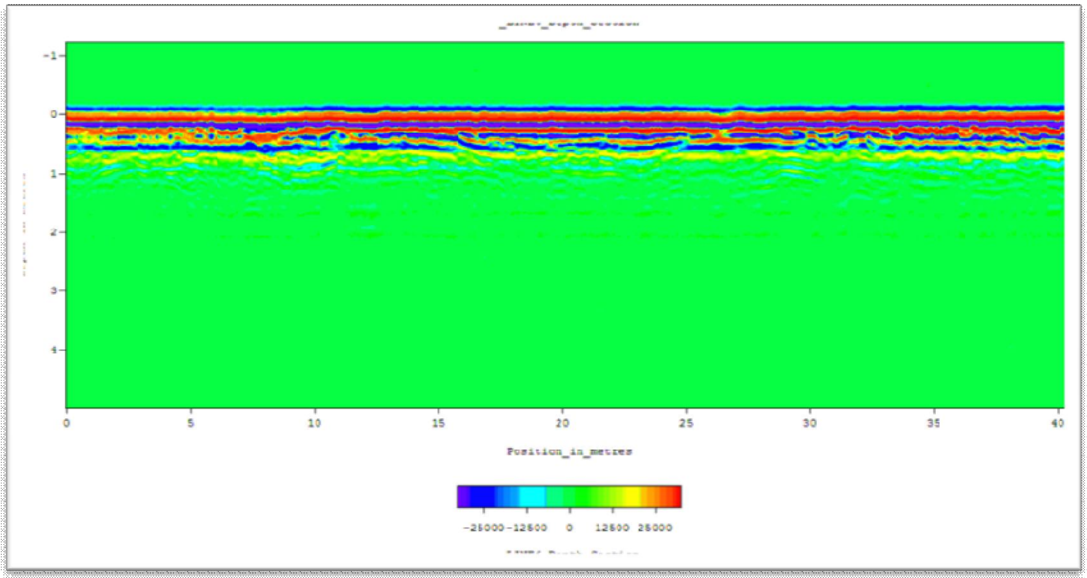
شکل ۴-۲۵ شبه مقطع و مقطع مدل سازی پروفیل ۷ را با فاصله الکترودی ۲/۵ متر نشان می‌دهد که عمق بررسی این پروفیل تا ۴/۲۵ متر نیز رسیده است. توزیع مقاومت ویژه این مقطع هم‌خوانی خوبی با مقطع نمایش داده شده با فاصله الکترودی ۱/۵ متری در شکل ۴-۲۴ دارد.



شکل ۴-۲۵: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۷ با فاصله الکترودی برداشت ۲/۵ متر (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

موقعیت قنات نیز در ۱۹/۵ متری و در عمق ۱ متر مشخص شده است. در این مقطع قسمت اعظم قنات با وضوح نسبتا خوبی نشان داده شده است. در هر دو مقطع از این پروفیل افزایش مقاومت ویژه بالایی در عمق زیاد و نزدیک انتهای پروفیل مشاهده می‌شود. این افزایش مقاومت ویژه را می‌توان به افزایش ابعاد ذرات و بالا رفتن نسبت شن و ماسه در این قسمت، تفسیر کرد.

شکل ۴-۲۶ مقطع GPR پروفیل ۷ را به نمایش می‌گذارد. فیلتر DEWOW و بهره از نوع اتوماتیک بر روی داده‌های این پروفیل اعمال شده است. با توجه به افزایش عمق قنات و نفوذ کم داده‌های رادار اثری از قنات مورد بررسی در این مقطع دیده نمی‌شود.



شکل ۴-۲۶: مقطع عمقی پروفیل ۷ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره اتوماتیک

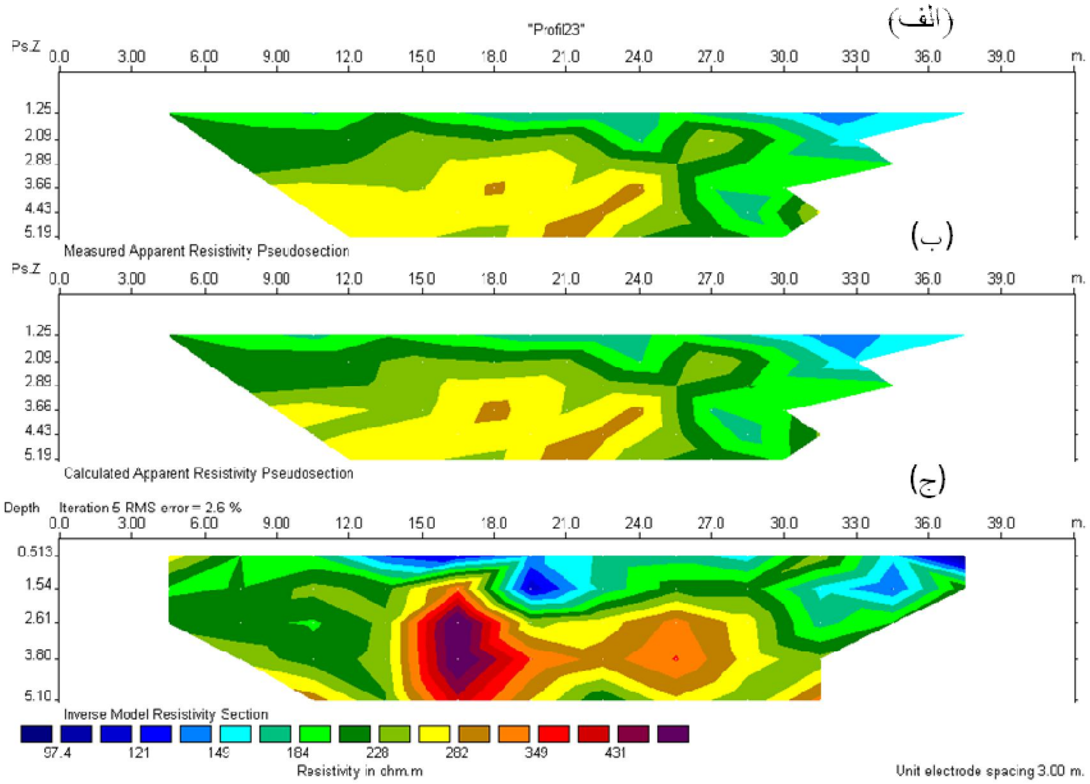
در این مقطع به نکات زیر می‌توان پی برد. عمق نفوذ نسبتا کم این مقطع را می‌توان ناشی از وجود میزان رس بالا و یا رطوبت بالای خاک در زمان برداشت دانست. در موقعیت‌های ۹ و ۳۰

متری عمق نفوذ بالاتری در مقطع مشاهده می‌شود که می‌توان وجود شن و ماسه و بزرگتر بودن ابعاد ذرات در این محل‌ها را به عنوان دلیل این افزایش عمق نفوذ تفسیر کرد. در مقاطع الکتریک نیز در این قسمت‌ها مقاومت ویژه‌ی بالاتری نسبت به زمینه مشاهده شد.

۴-۶-۲- ۵- تفسیر پروفیل ۸

این پروفیل پس از برداشت پروفیل‌های ۱ تا ۷ به منظور بررسی بهتر تغییرات عمق قنات و پوشش کامل‌تر منطقه با فاصله الکترودی ۳ متر برداشت شد. در فاصله ۱۷/۵ متر بالاتر از این پروفیل امکان اندازه‌گیری سطح آب وجود داشت که پس از اندازه‌گیری مشخص شد که سطح آب در این نقطه ۵/۳۵ متر می‌باشد.

شکل ۴-۲۷ شبه مقطع و مقطع مدل سازی شده پروفیل ۸ را نشان می‌دهد. در اینجا ممکن است به دلیل زیاد شدن فاصله الکترودی، قدرت تفکیک تا حدودی کاهش یابد ولی قنات در این پروفیل به طور کامل و با وضوح مشخص شده است.

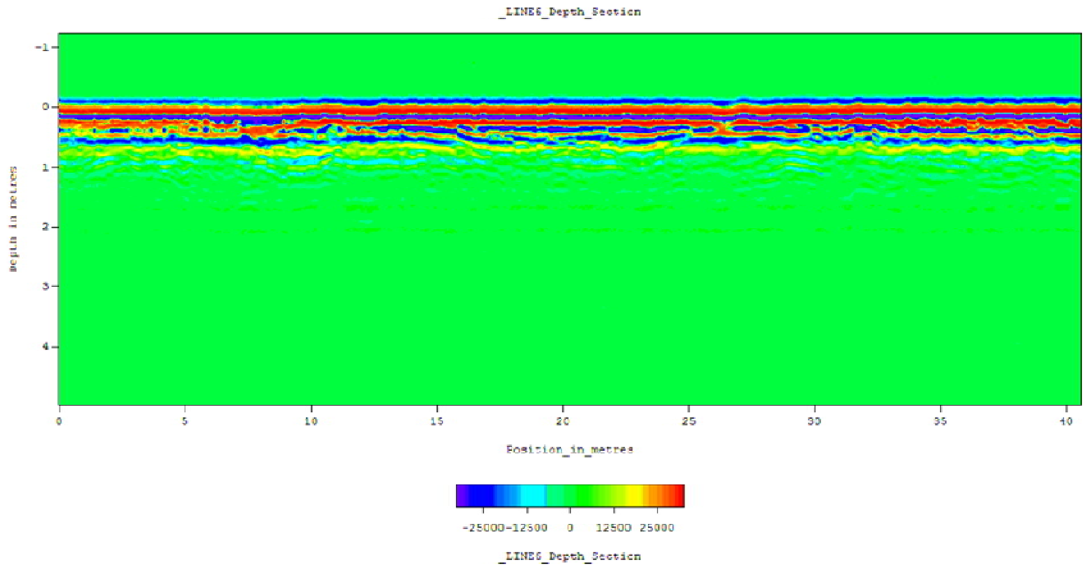


شکل ۴-۲۷: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۸ با فاصله الکترودی برداشت ۳ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

بر طبق داده‌های مقاومت ویژه در این پروفیل قنات در ۱۶ متری قرار داشته و از عمق ۲ تا ۴ متری کشیده شده است. این ضخامت ۲ متری برای قنات با توجه به مشاهدات تا حدودی غیر واقعی و اغراق آمیز به نظر می‌رسد و این خود نیز شاهدی بر قدرت تفکیک افقی کم آرایش دوقطبی– دوقطبی می‌باشد.

در موقعیت ۲۵ متری این پروفیل افزایش مقاومت ویژه‌ای مشاهده می‌شود که تا حدود ۴۰۰ اهم متر افزایش را نشان می‌دهد. این افزایش را می‌توان به وجود حفرات کوچک حاوی آب و یا افزایش موضعی ابعاد دانه‌بندی نسبت داد.

مقطع رادار پروفیل ۸ با اعمال فیلتر DEWOW و بهره AGC با مقادیر مولفه پیش فرض در شکل ۴-۲۸ نشان داده شده است. این مقطع نیز مانند مقطع پروفیل ۷ قادر به نمایش اثر قنات نمی‌باشد. از این مقطع تنها می‌توان به مواردی چون عمق نفوذ نه چندان بالا نسبت به دیگر پروفیل‌ها اشاره کرد و اینکه عمق نفوذ بیشتر امواج رادار در ابتدای پروفیل نشان دهنده وجود ذرات با ابعاد بزرگتر در این قسمت است.



شکل ۴-۲۸: مقطع عمقی پروفیل ۸ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره AGC

۴-۶-۳- تفسیر پروفیل‌های موازی با قنات

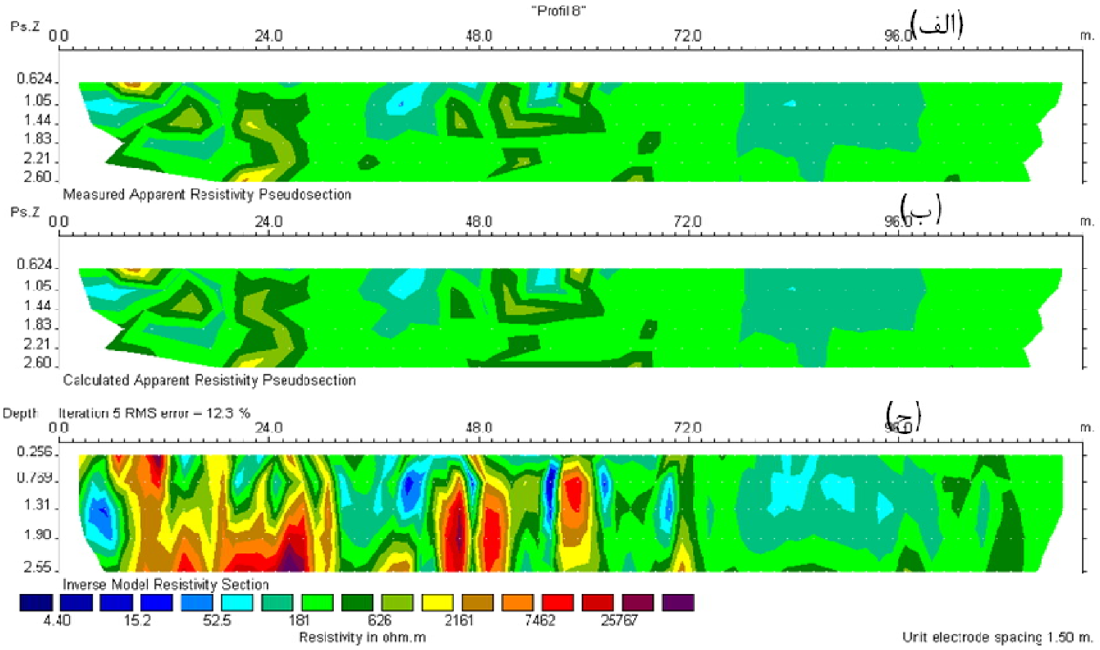
پس از اتمام برداشت پروفیل‌های عمود بر قنات به منظور تهیه مقاطع موازی قنات، استفاده در تفسیر سه‌بعدی و شناسایی توزیع مقاومت ویژه در جهات مختلف، پروفیل‌هایی به موازات قنات نیز برداشت شد. از خصوصیات این پروفیل‌ها این بود که هر یک از آنها ابتدا و یا انتهای تعدادی از پروفیل‌های عمود بر قنات را قطع کردند. بر روی این پروفیل‌ها برداشت‌های توموگرافی الکتریکی و در صورت امکان برداشت GPR مانند پروفیل‌های عمود بر قنات انجام شد.

پروفیل‌های برداشتی تحت نامهای پروفیل ۹، ۱۰، ۱۱ و ۱۲ نام‌گذاری شدند. برداشت پروفیل‌های ۹ و ۱۰ با فاصله الکترودی ۱/۵ متر در بخش دوم انجام پذیرفت. همچنین پروفیل‌های ۱۱ و ۱۲ با فاصله الکترودی ۱ متر در بخش اول برداشت گردید. پروفیل ۹ به گونه‌ای برداشت شد که ابتدای پروفیل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ راقطع کند. به همین ترتیب پروفیل ۱۰ از انتهای پروفیل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ گذشت. پروفیل ۱۱ و پروفیل ۱۲ به ترتیب انتها و ابتدای پروفیل‌های ۱، ۲ و ۳ را قطع نمود.

۴-۶-۳- ۱- تفسیر پروفیل ۹

این پروفیل به طول ۱۱۷ متر و با فاصله الکترودی ۱/۵ متر به گونه‌ای برداشت شد که نقاط اغازین پروفیل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ را قطع کند. باید توجه کرد که ۶۷/۵ متر اول این پروفیل بر روی زمین کشاورزی برداشت شد. شکل ۴-۲۹ شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی مقاومت ویژه این پروفیل را نشان می‌دهد. همان‌طور که ذکر شد این پروفیل با فاصله الکترودی ۱/۵ متر برداشت گردید، در نتیجه مقطع موجود تا عمق ۲/۵۵ متری را بررسی می‌کند. در ۶۷ متر ابتدای این پروفیل که بر روی زمین کشاورزی قرار دارد تغییرات و ناهمگنی مقاومت ویژه به وضوح قابل مشاهده است. در بعضی قسمت‌های این پروفیل افزایش مقاومت ویژه مشهود است تا جایی که در موقعیت ۲۵ تا ۲۷

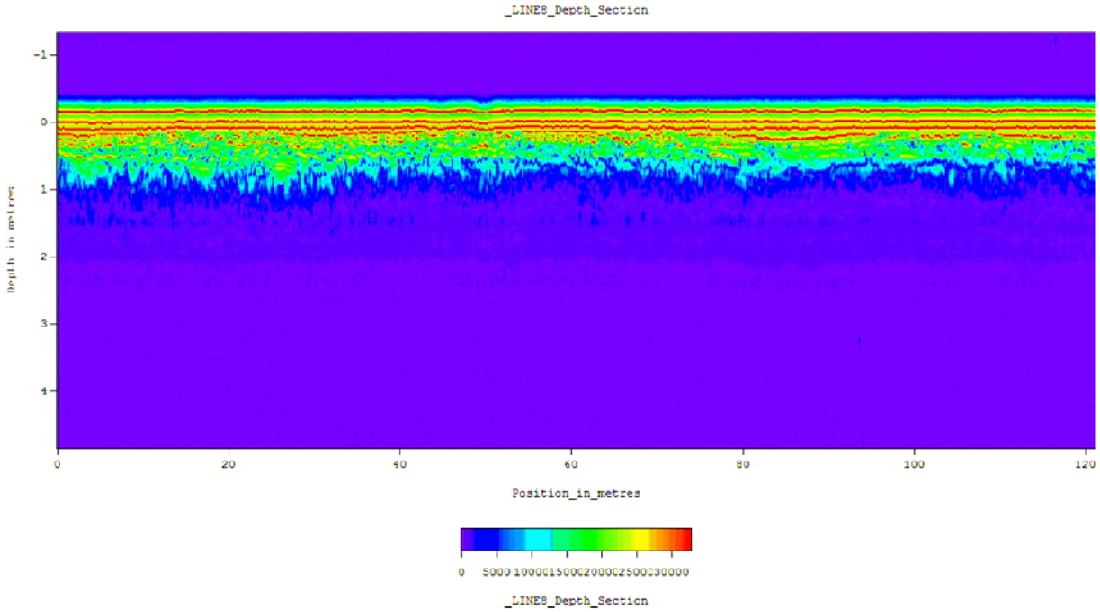
متری مقاومت ویژه به بیش از ۲۰۰۰۰ اهم متر نیز می‌رسد. برداشت داده‌های مربوط به این نقطه بیش از ۱۰ بار تکرار گردید تا از لحاظ اعتبار داده اعتماد حاصل شود. در حالت عادی این میزان بالای مقاومت ویژه حفره هوا تفسیر می‌شود اما با توجه به عمق کم این قسمت و کشاورزی بودن زمین آن، احتمال وجود حفره هوا با ابعاد متریک بسیار ضعیف می‌باشد و حداکثر بتوان وجود حفرات کوچک هوا را به عنوان عامل این افزایش شدید دانست. علاوه بر موقعیت ذکر شده محل‌های دیگری نیز بر روی این پروفیل با شرایط مشابه در مقطع مشخص می‌باشند که تمام این محل ها در زمین کشاورزی قرار دارند. از آنجا که این برداشت‌ها بر روی زمین‌های با خاک سست انجام گرفت ممکن است عوامل دیگری مانند عدم تماس کامل الکترود با زمین باعث ثبت این مقاومت ویژه غیر نرمال شده باشد.



شکل ۴-۲۹: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۹ با فاصله الکترودی برداشت ۱/۵ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

با خروج الکترودها از زمین کشاورزی و از فاصله ۶۷ متری این پروفیل تا انتهای آن توزیع مقاومت ویژه یکنواخت شده و به حالت نرمال پیش بینی شده خود بازمی‌گردد. قسمت دوم این پروفیل (از فاصله ۶۷ متری تا انتهای پروفیل) دارای مقدار زمینه حدودی ۲۵۰ اهم متر بوده که نشان دهنده وجود آبرفت‌های دانه متوسط به عنوان پوشش غالب منطقه می‌باشد. در بعضی از موقعیت‌ها از قسمت دوم پروفیل مقاومت ویژه کاهش می‌یابد که می‌تواند ناشی از وجود رطوبت و یا رس بیشتر در این قسمت‌ها باشد.

مقطع GPR پروفیل ۹ پس از اعمال فیلتر DEWOW، بهره از نوع اتوماتیک و مشخصه Envelope در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. در این پروفیل به بررسی لایه بندی زیرسطحی و میزان رس و رطوبت پرداخته می‌شود تا قدرت روش GPR در شناسایی لایه‌بندی زیرسطحی نیز بررسی شده و این قابلیت GPR را نیز با روش توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه مقایسه کنیم.



شکل ۴-۳۰: مقطع عمقی پروفیل ۹ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره از نوع اتوماتیک و مشخصه Envelope

مقطع بالا پس از جابجایی صفر زمانی نمایش داده شده است. مرز لایه‌بندی در این پروفیل به وضوح قابل تشخیص است(مرکز خطوط قرمز). در ابتدای تفسیر این پروفیل باید ذکر شود که ۲ خط قرمز رنگ اول به ترتیب ناشی از موج مستقیم از فرستنده به گیرنده و موج بازتابی از سطح زمین می‌باشند و باید توجه کرد تا به اشتباه به عنوان لایه بندی زیرسطحی تفسیر نشوند.

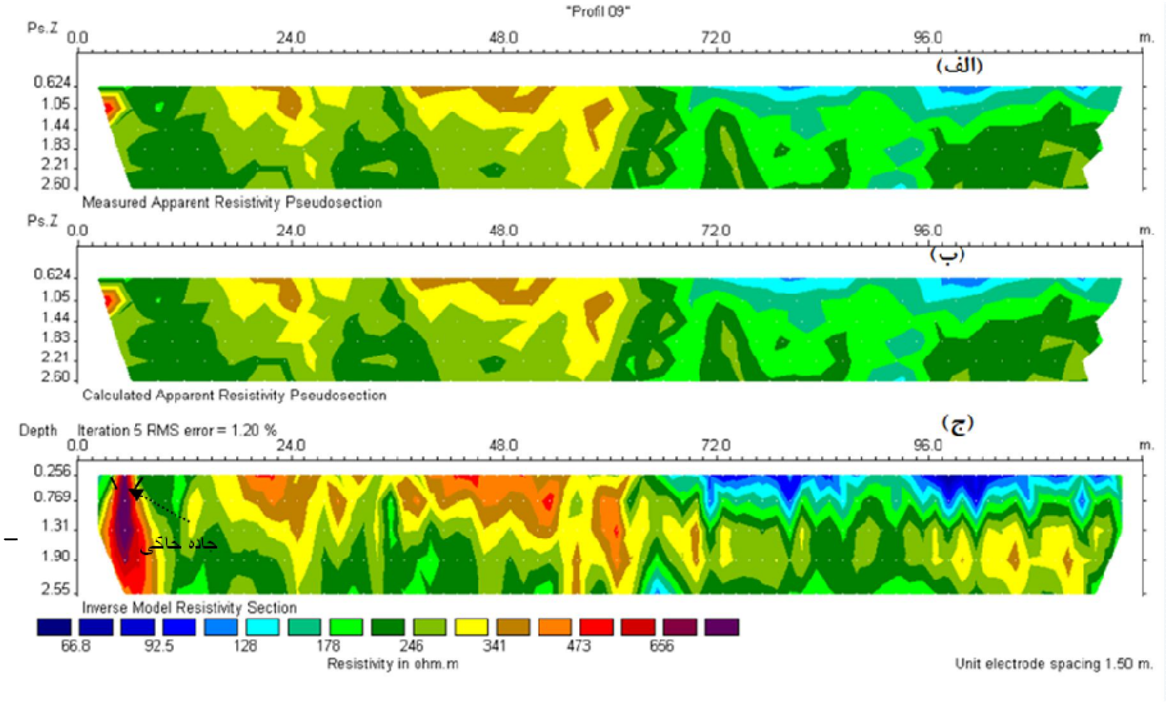
لایه اول این پروفیل با ضخامت ثابت ۹ سانتیمتر از ابتدا تا انتهای پروفیل مشاهده می‌شود. لایه دوم این مقطع با ضخامت ۱۰ سانتیمتر در این پروفیل تغییرات قابل بررسی را از خود نشان می‌دهد. در ابتدای پروفیل این لایه با ضخامت ثابت تا فاصله ۱۰ متری پروفیل پیش رفته است اما از اینجا به بعد به دلیل تاثیر فعالیت کشاورزی بر لایه‌بندی مرز این لایه محو می‌شود و باز از فاصله ۳۰ تا ۵۰ متری مرز لایه در مقطع نمایان می‌شود. این لایه از فاصله ۵۰ تا ۵۸ متری محو و دوباره از فاصله ۵۸ تا ۶۷ متری مشخص و باز هم از فاصله ۶۷ تا ۸۰ متری ناپدید می‌گردد. ضخامت این لایه از فاصله ۸۰ تا ۹۳ متری تغییر می‌کند و حتی در ۸۸ متری به حدود ۲۰ سانتیمتر می‌رسد. این لایه از فاصله ۹۵ متری تا انتهای پروفیل نیز به صورت نیمه مشخص در مقطع قابل مشاهده است. علاوه بر این دو لایه، تعداد سه لایه دیگر نیز به صورت مبهم در بعضی از قسمتهای این پروفیل قابل مشاهده است.

عمق نفوذ رادار از ابتدا تا ۶۰ متری پروفیل نسبت به دیگر قسمت پروفیل بیشتر است که دلیل این عمق نفوذ بیشتر را می‌توان به وجود ذرات دانه درشت‌تر و یا به احتمال قوی‌تر میزان رطوبت کمتر خاک در این قسمت ارتباط دارد. عمق نفوذ امواج رادار در این پروفیل آنقدر زیاد نیست که بتوان با استفاده از آن محلی که در مقطع مقاومت ویژه با احتمال وجود حفره مواجه شد را بررسی کند. اما با توجه به عدم تغییری خاص در شکل امواج احتمال وجود حفره در این قسمت به شدت کم می‌باشد و با توجه به این نکته تفسیر مقاومت ویژه در این پروفیل و مخصوصا در زمین کشاورزی غیر قابل اعتماد به نظر می‌رسد.

۴-۶-۳- ۲- تفسیر پروفیل ۱۰

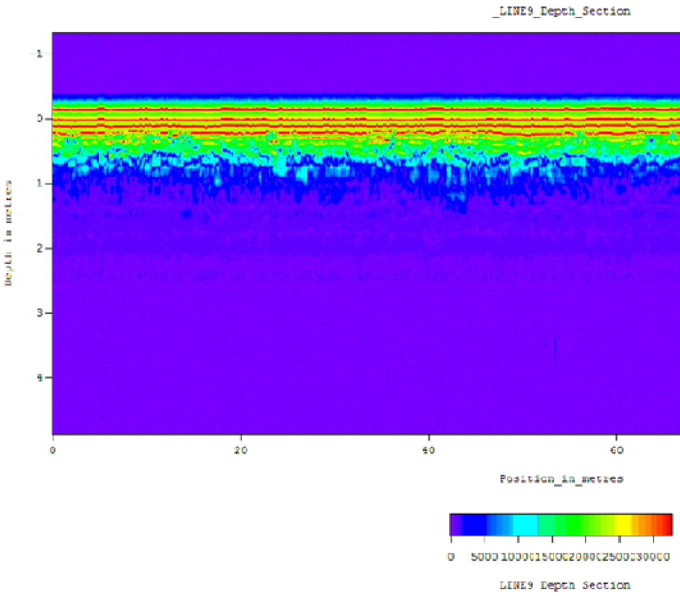
پروفیل ۱۰ با طول ۱۲۰ متر به گونه ای برداشت شد که انتهای پروفیل‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ را قطع کند. شکل ۴-۳۱ شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی داده های این پروفیل را نشان می‌دهد. در این پروفیل مقاومت ویژه زمینه در بازه ۳۴۰ – ۱۷۰ اهم متر تغییر می‌کند که همچون دیگر پروفیل‌های برداشت شده نشان دهنده وجود آبرفت‌های دانه متوسط به عنوان پوشش غالب منطقه می‌باشد. البته رنج مقدار زمینه مقاومت ویژه در این پروفیل تا حدودی بیشتر از پروفیل‌های دیگر است که حاکی از ابعاد بزرگتر ذرات تشکیل دهنده و یا حتی میزان رطوبت کمتر در این پروفیل بوده است.

در اوایل این پروفیل محدوده کوچکی با مقاومت ویژه بالا مشاهده می‌شود که تا عمق ادامه دارد. این محل منطبق بر جاده خاکی بوده که اوایل این پروفیل از آن عبور کرده است. تا نزدیک به مرکز این پروفیل در بعضی قسمت‌های کم عمق افزایش مختصری در مقاومت ویژه قابل رویت است که نشان از تبخیر زیاد و خشک شدن خاک در این قسمت‌ها دارد. از فاصله ۲۷ متری تا انتهای پروفیل نیز کاهش مقاومت ویژه در بعضی جاها مشاهده می‌شود که در بازدید مجدد منطقه در این قسمت‌ها کمی رس مشاهده شد.



شکل ۴-۳۱: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۱۰ با فاصله الکترودی برداشت ۱/۵ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

مقطع GPR پروفیل ۱۰ نیز در شکل ۴-۳۲ پس از جابجایی صفر زمانی مشاهده می‌شود. بر روی داده‌های این پروفیل فیلتر DEWOW، بهره از نوع اتوماتیک و در نهایت مشخصه Envelope اعمال شده است. بر روی مقطع این پروفیل، ۲ لایه به وضوح قابل تشخیص است و در ضمن یک یا دو لایه به صورت محو یا نامشخص در زیر این ۲ لایه می‌توان شناسایی کرد. لایه اول با ضخامت یکسان ۱۰ سانتیمتر از ابتدا تا انتهای پروفیل دیده می‌شود. لایه دوم نیز در ابتدای پروفیل با ضخامت ثابت ۱۱ سانتیمتر تا فاصله ۷۰ متری پروفیل وجود دارد و از این قسمت به بعد تا نزدیکی انتهای پروفیل مرز شناسایی شده لایه دارای اغتشاش شده و ضخامت آن در بعضی قسمت‌ها تا ۲۰ سانتیمتر زیاد می‌شود. لایه‌های دیگری در زیر این دو لایه می‌توان به صورت مبهم مشاهده کرد.



شکل ۴-۳۲: مقطع عمقی پروفیل ۱۰ با اعمال فیلتر DEWOW و استفاده از بهره از نوع اتوماتیک و مشخصه Envelope

در اینجا ذکر این نکته ضروری است که مرزهای تشخیص داده شده به وسیله GPR در حالت کلی از نوع مرزهای ژئوالکتریکی بوده و ممکن است با مرزهای زمین‌شناسی هم‌خوانی یا انطباق نداشته باشد.

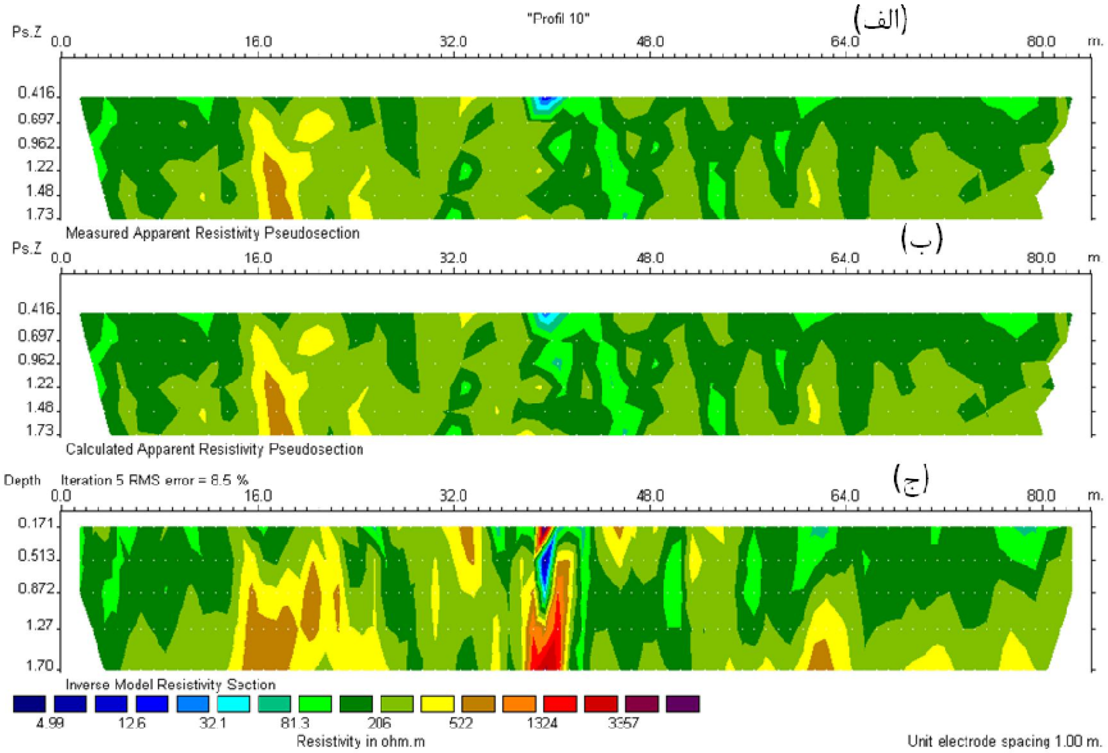
عمق نفوذ GPR در ۶۰ متر ابتدایی این پروفیل به میزان کمی بیشتر از ادامه پروفیل است که این رویداد با داده‌های مقاومت ویژه هم‌خوانی دارد.

۴-۶-۳- ۳- تفسیر پروفیل۱۱

این پروفیل با طول ۸۴ متر به گونه ای برداشت شد که انتهای پروفیل‌های ۱، ۲ و ۳ را قطع می‌کند. در این پروفیل به دلیل وجود یک دیوار سنگ چین کوچک امکان برداشت GPR وجود

نداشت و تنها برداشت توموگرافی الکتریکی در طول این پروفیل با فاصله الکترودی ۱ متر انجام پذیرفت.

در شکل ۴-۳۳ شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی پروفیل ۱۱ نشان داده شده است. یکنواختی توزیع مقاومت ویژه در این پروفیل به وضوح قابل مشاهده است. مقاومت ویژه زمینه این پروفیل در حدود ۸۰ تا ۲۰۰ اهم متر تغییر می‌کند. این مقدار بیان کننده وجود آبرفت دانه متوسط است که با کاهش مقاومت ویژه به سمت ۸۰ اهم متر ابعاد دانه بندی ذرات کاهش یافته و حتی میزان رس نیز بالا می‌رود.



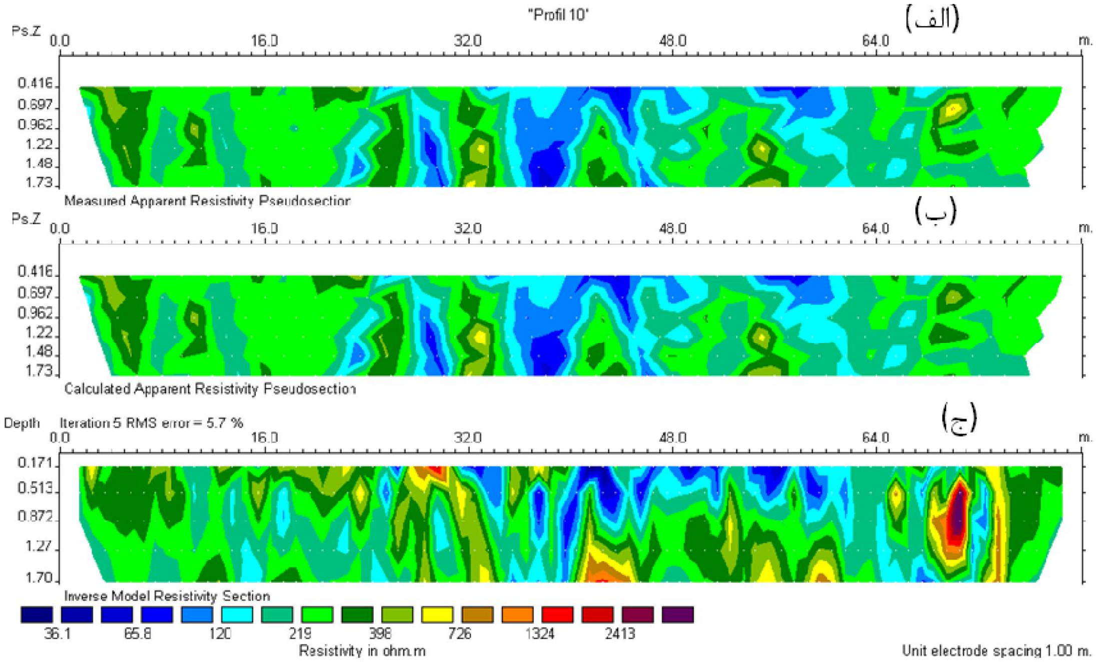
شکل ۴-۳۳: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۱۱ با فاصله الکترودی برداشت ۱ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در مرکز این پروفیل افزایش قابل توجهی در مقاومت ویژه به سمت عمق مشاهده می‌شود. افزایش مقاومت ویژه در اینجا نشان دهنده افزایش ابعاد ذرات بوده که با توجه به مقدار بالای افزایش مقاومت ویژه در این قسمت احتمال افزایش ابعاد در حد شن و ماسه کم می‌باشد و باید امکان وجود سنگ هوازده نشده با ابعاد متریک و یا حفرات هوا را در این مکان بررسی کرد. بررسی این محل با روش دیگری مثل روش GPR می‌توانست در شناسایی کامل‌تر این ناحیه کمک شایانی کند و اطمینان تفسیر را بالا ببرد، اما ضعف برداشت پروفیل زنی GPR در برخورد با موانع اجازه انجام این برداشت را نداده است.

۴-۶-۳- ۴- تفسیر پروفیل ۱۲

این پروفیل همچون پروفیل ۱۱ با طول ۸۴ متر به موازات جهت قنات برداشت شد. محل برداشت این پروفیل به گونه ای انتخاب شد که ابتدای پروفیل‌های ۱، ۲ و ۳ را قطع کند. در این پروفیل به دلیل تغییرات توپوگرافی ناگهانی و تل‌های خاک متوالی و کوچک امکان برداشت GPR با داده‌های قابل اعتماد وجود نداشت. به همین دلیل همچون پروفیل قبلی در این پروفیل نیز تنها برداشت توموگرافی الکتریکی با فاصله الکترودی ۱ متر انجام گرفت.

شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل سازی پروفیل ۱۲ در شکل ۴-۳۴ نشان داده شده است. در این پروفیل ناهمگنی جانبی مقاومت ویژه قابل مشاهده می‌باشد تا جایی که با اطمینان نمی‌توان یک بازه مقاومت ویژه برای زمینه این پروفیل تعریف کرد. با این حال با توجه به مقادیر مقاومت ویژه می‌توان مشاهده کرد که مانند دیگر پروفیل‌ها، آبرفت‌های دانه متوسط متن اصلی این پروفیل را تشکیل داده است.



شکل ۴-۳۴: شبه مقطع و مقطع حاصل از مدل‌سازی داده‌های توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه پروفیل ۱۲ با فاصله الکترودی برداشت ۱ متر. (الف) شبه مقطع داده‌های مشاهده شده، (ب) شبه مقطع حاصل از مدل‌سازی، (ج) مدل معکوس

در مقطع این پروفیل و در بعضی قسمت‌های کم عمق آن مقاومت ویژه کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهد. میزان مقاومت ویژه پایین در این قسمت‌ها (≤ ۷۰ اهم متر) احتمال وجود رس را بالا می‌برد که مشاهدات صحرایی نیز تایید کننده این موضوع بود.

در فاصله ۷۴ تا ۷۵ متری پروفیل و از عمق ۰/۵ تا ۱/۳ متری یک افزایش شدید مقاومت ویژه مشاهده می‌شود که احتمالا ناشی از وجود سنگ هوازده نشده نابرجا با ابعاد حدوداً مشخص و یا مجموعه ای از حفرات کوچک هوا می‌باشد.

پس از برداشت پروفیل‌های توضیح داده شده همان طور که قبلا نیز ذکر شد تعداد ۳ پروفیل مقاومت ویژه و ۷ پروفیل GPR بین پروفیل‌های ۲ و ۳ به منظور مدل‌سازی سه بعدی (3-D) برداشت گردید، که با توجه به هدف اصلی برداشت این پروفیل‌ها و پرهیز از یکنواختی این فصل از تفسیر دوبعدی این پروفیل‌ها پرهیز شد. این پروفیل‌ها در مدل‌سازی سه بعدی به کار رفتند که در فصل بعد توضیح داده می‌شود.

فصل پنجم

تصویرسازی و مدل‌سازی سه‌بعدی (3D)

۵-۱- مقدمه

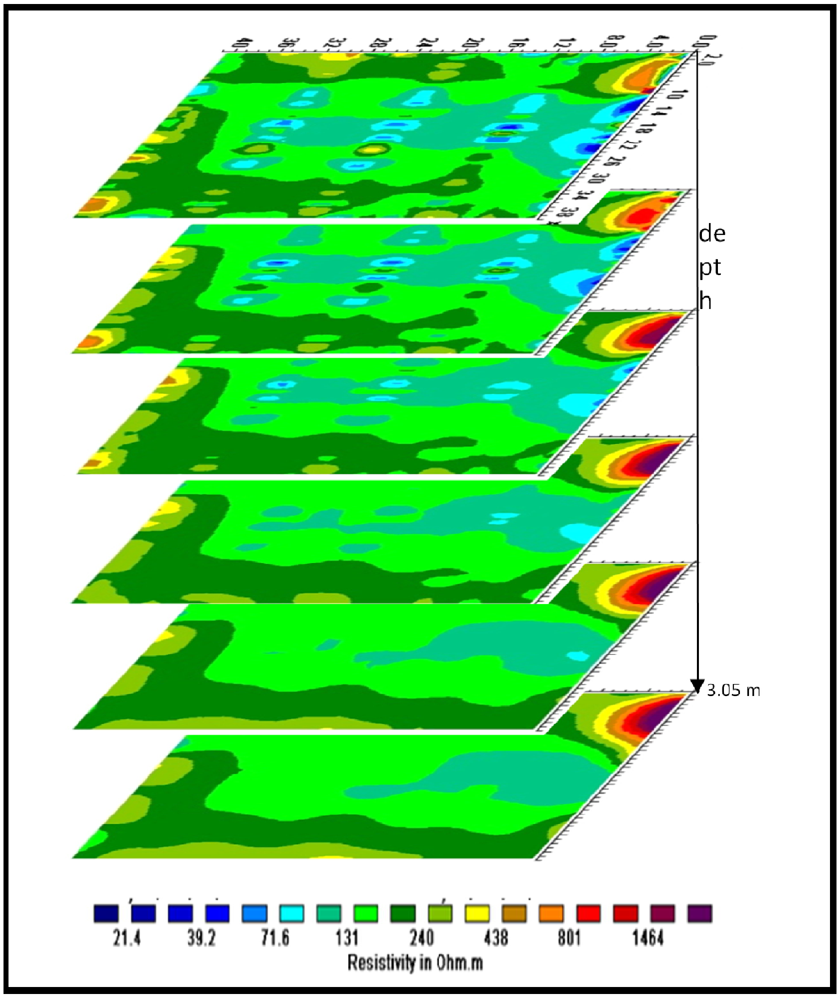
از آنجایی که تمام ساختارهای زمین‌شناسی در طبیعت سه‌بعدی هستند، یک برداشت مقاومت ویژه کاملاً سه‌بعدی با استفاده از یک مدل تفسیر سه‌بعدی می‌تواند در تئوری دقیق‌ترین جوابها را بدهد [Loke, 2004]. در این تحقیق در حد فاصل بین پروفیل‌های ۲ و ۳، تعداد سه پروفیل الکتریک با فاصله الکترودی ۱ متر دیگر برداشت گردید تا بتوان بررسی و نیز تفسیر سه‌بعدی مقاومت ویژه را با دقت خوبی انجام داد. در نتیجه برای مدل‌سازی سه‌بعدی مقاومت ویژه در این فاصله ۴۰ متری ۵ پروفیل توموگرافی الکتریکی مقاومت ویژه وجود دارد که فاصله هر کدام از یکدیگر ۱۰ متر می‌باشد. در مقایسه با روش توموگرافی الکتریکی سهولت و سرعت بیشتر روش GPR باعث شد تا پروفیل‌های روش رادار نفوذی به زمین با فواصل کمتر (۵ متر) در حد فاصل پروفیل‌های ۲ و ۳ برداشت گردند. در نتیجه علاوه بر پروفیل‌های ۲ و ۳، داده‌های ۷ پروفیل دیگر نیز به منظور مدل-سازی سه‌بعدی رادار نفوذی به زمین در این قسمت به دست آمد.

در مدل‌سازی جهت برداشت پروفیل‌ها، جهت x و مسیر قنات، که پروفیل‌ها عمود بر آن برداشت گردیدند، جهت y در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه طول هر پروفیل ۴۰ متر بوده و نیز حدود ۴۰ متر از قنات در این مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت، شبکه مدل‌سازی یک شبکه ۴۰×۴۰ متر می‌باشد.

۵-۲- بررسی و تفسیر سه‌بعدی (3D) توموگرافی الکتریکی

مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های مقاومت ویژه با استفاده از نرم افزار RES3DINV انجام گرفت که مقطع حاصل از مدل‌سازی آن در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است. مقطع مدل‌سازی به دست آمده شامل ۶ مقطع عمقی می‌باشد که لایه اول میانگین مقاومت ویژه در محدوده عمقی ۰/۳۵ – ۰

متری را نشان می‌دهد. مقاطع بعدی نیز به ترتیب میانگین مقاومت ویژه برای عمق‌های ۰/۷۵ – ۰/۳۵، ۱/۲۲ – ۰/۷۵، ۱/۷۵ – ۱/۲۲، ۲/۳۶ – ۱/۷۵ و در نهایت ۳/۰۶ – ۲/۳۶ متر را ترسیم نموده-اند.

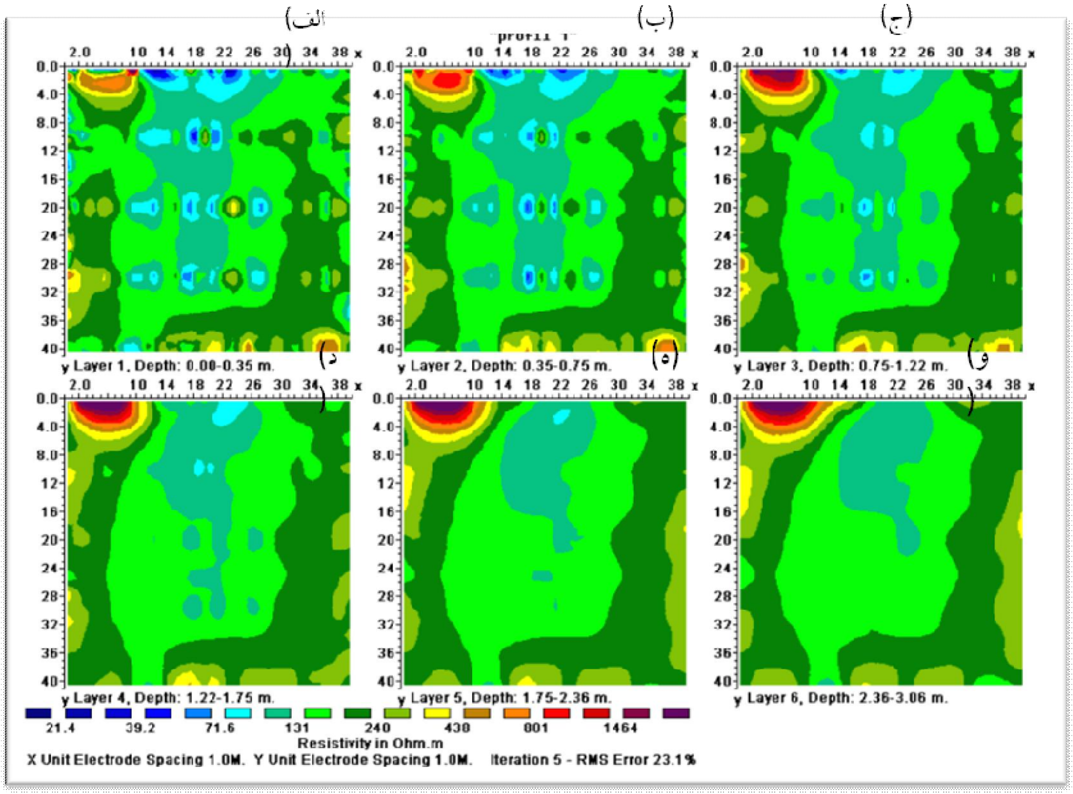


شکل ۵-۱: نمایش سه‌بعدی مقطع توموگرافی الکتریکی

سعی شده تا قنات در موقعیت ۲۰ متری جهت x برای تمام پروفیل‌ها قرار داشته باشد. با نگاهی کلی به این مقاطع می‌توان یکنواختی نسبی مقاومت ویژه را تا عمق مورد بررسی مشاهده کرد.

مقاومت ویژه غالب این مقاطع در محدوده ۲۵۰ – ۱۶۰ اهم متر می‌باشد که نشان از پوشش این منطقه به وسیله آبرفت‌های دانه متوسط دارد. مشاهدات صحرایی و تفسیر دوبعدی پروفیل‌های مقاومت ویژه در فصل ۴ این موضوع را تایید کرده است. برای بررسی کامل و دقیق‌تر باید هر مقطع به صورت جداگانه بررسی شود.

شکل ۵-۲ مقاطع مدل‌سازی را به صورت جداگانه نمایش می‌دهد. در این مقاطع نفوذ آب از قنات به محیط اطراف به وضوح قابل مشاهده است. ابعاد کم قنات، فواصل برداشت زیاد در جهت y و عدم تباین بالای مقاومت ویژه قنات با محیط اطراف باعث شده تا در این مقاطع قنات با وضوح بالایی مشخص نباشد.



شکل ۵-۲: مقاطع سه‌بعدی مقاومت ویژه

شکل "الف" از مقاطع بالا میانگین مقاومت ویژه برای عمق ۰/۳۵ – ۰ متر را نشان می‌دهد. در این مقطع اثر نفوذ رطوبت به محیط اطراف بیشتر از مقاطع دیگر می‌باشد که می‌توان علت را در خاصیت مویینگی و فشردگی کم‌تر خاک اطراف قنات در عمق کم جستجو کرد. اثر قنات در بعضی از قسمت‌ها در این مقطع مشاهده می‌شود. مقاومت ویژه در فاصله ۲ تا ۱۰ متری جهت x و ۰ تا ۵ متری جهت y سیر صعودی از خود نشان می‌دهد.

شکل "ب" نیز میانگین مقاومت ویژه برای عمق ۰/۷۵ – ۰/۳۵ متری می‌باشد. اثر قنات در این مقطع وضوح بالاتری نسبت به دیگر پروفیل‌ها دارد. با توجه به این موضوع می‌توان نتیجه گرفت قسمت اعظم قنات در این محدوده عمقی قرار دارد. قسمتی که در مقطع عمقی ۰/۳۵ – ۰ افزایش مقاومت ویژه را نشان می‌دهد، در این مقطع با افزایش بیشتر مقاومت ویژه مشخص شده است.

شکل "ج" مقطع عمقی برای عمق ۱/۲۲ – ۰/۷۵ متر را ترسیم نموده است. در این پروفیل نفوذ رطوبت به اطراف شدت کمتری پیدا کرده و اثر قنات نیز تقریبا محو شده است. از این موارد می‌توان نتیجه گرفت که این عمق پایین‌تر از قنات و یا حداکثر کف قنات را شامل می‌شود. قسمتی که در مقاطع قبلی افزایش مقاومت ویژه را نشان می‌داد در اینجا با مقاومت ویژه کاملا بالا و شدید نمایش داده شده است.

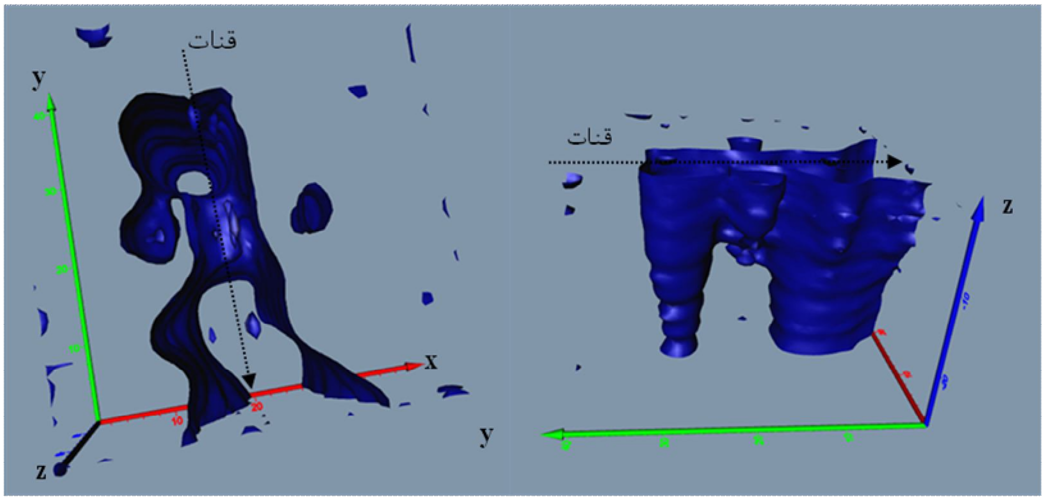
شکل‌های "د"، "ه" و همچنین "و" فاصله عمقی ۱/۲۲ تا ۳/۰۵ متر را نشان می‌دهد. در این مقاطع اثری از قنات مشاهده نمی‌شود و با حرکت به سمت عمق نفوذ رطوبت هم کاهش می‌یابد. افزایش مقاومت ویژه در ناحیه معین از پروفیل‌های قبلی در این پروفیل‌ها نیز روند افزایش خود را همچنان نشان می‌دهد.

با بررسی مقاطع حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی مشخص می‌شود که حجم زیادی از قنات در عمق ۰/۷۵ - ۰/۳۵ متری قرار دارد. همچنین در محدوده ۱۰ -۲ متری محور x و ۵ – ۰ متری محور

y با حرکت به عمق افزایش شدید مقاومت ویژه مشاهده می‌شود. علت این افزایش را می‌توان در وجود حفرات کوچک هوا و یا وجود سنگ هوازده نشده با ابعاد معین تعریف کرد. برای اطمینان از تفسیر در این قسمت حفاری و نمونه برداری ضروری به نظر می‌رسد.

۵-۳- نمایش سه‌بعدی محیط پیرامون قنات

به علت فواصل نسبتا زیاد پروفیل‌ها از یکدیگر و همچنین قدرت تفکیک کم روش توموگرافی الکتریکی در تشخیص قنات در این قسمت، مقطع نمایش داده شده به وسیله نرم افزار RES3DINV قنات را به صورت واضح نمایش نمی‌دهد. برای نمایش بهتر قنات در این بررسی از نرم افزار Voxler استفاده شد. برای انجام این کار ابتدا داده‌های مدل نرم افزار RES3DINV در قالب x, y, z ذخیره شد. این داده‌ها که تعداد آن‌ها بیش از ۹۸۰۰ بود به عنوان ورودی نرم افزار Voxler مورد استفاده قرار گرفت. برای نمایش جزئی‌تر، داده‌های عمقی ۱۰ برابر شد تا بتوان عمق را با وضوح بالاتری مورد بررسی قرار داد. به دلیل کوچک بودن مقطع قنات و عدم تباین بالای مقاومت ویژه آن با مقاومت ویژه زمینه در این محدوده این نرم افزار نیز نتوانست قنات را به خوبی نمایش دهد. اما نفوذ آب قنات به محیط اطراف به خوبی با کمک این نرم افزار قابل مشاهده است. شکل ۵-۳ نفوذ رطوبت از قنات به اطراف را از دو دید بالا و روبرو نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل می‌توان دید در وسط قسمتی که نفوذ رطوبت را نمایش می‌دهد، یک حجم با وضوح و البته پراکندگی فراوان مشاهده می‌شود. این حجم همان اثر قنات در این شکل می‌باشد.



(ب) (الف)

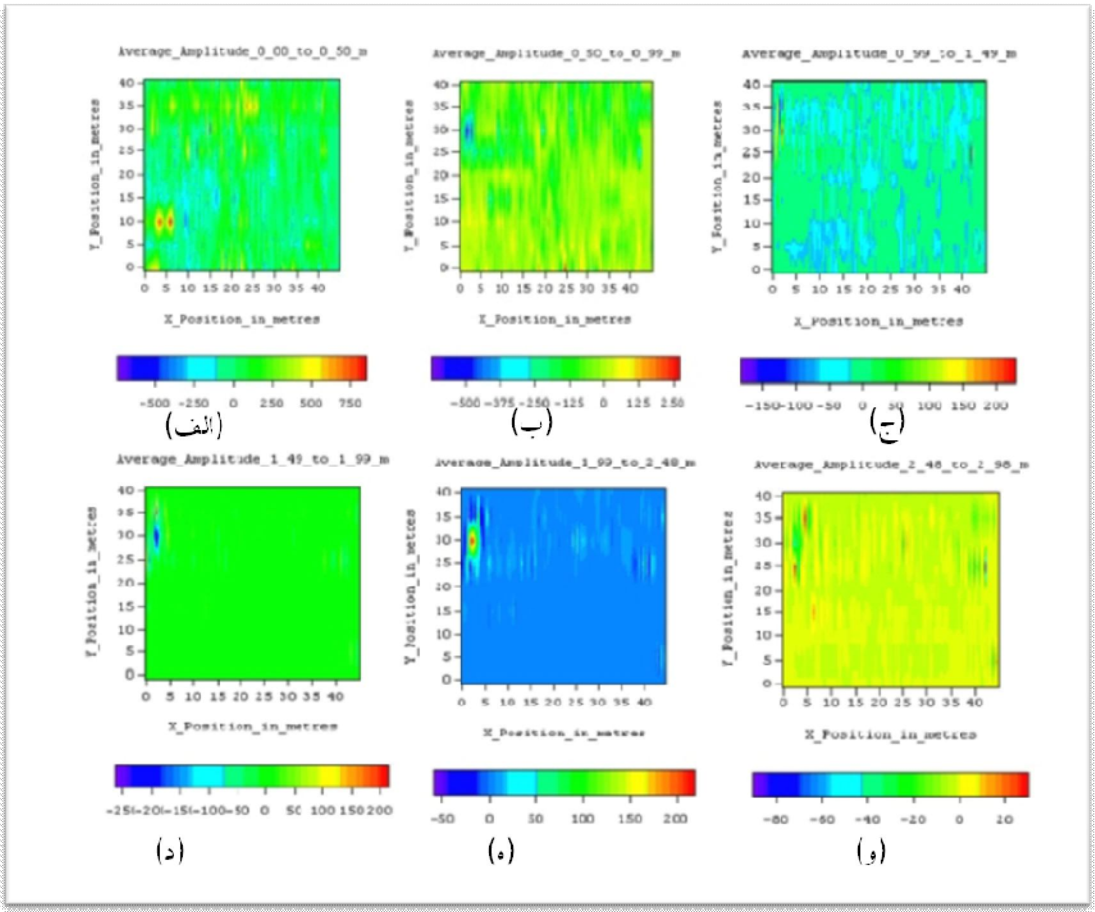
شکل ۵-۳: نمایش سه‌بعدی داده‌ها الف) دید از کنار. ب) دید از بالا

محیط پیرامون قنات که تحت تاثیر رطوبت قرار دارد، در سطح بیشتر است و با حرکت به سمت عمق از میزان پراکندگی این محیط کاسته می‌شود. دلیل این کاهش نفوذ در حرکت به سمت عمق را باید خاصیت موبینگی و مهم‌تر از آن فشردگی بیشتر خاک در عمق دانست. این اتفاق در شکل ۵-۳ کاملا قابل مشاهده است.

۵-۴- بررسی و تفسیر سه‌بعدی داده‌های GPR

از آنجا که داده‌های GPR مانند داده‌های توموگرافی الکتریکی به صورت یک شبکه منظم برداشت شده است، نمایش سه‌بعدی این داده‌ها نیز امکان پذیر است. برای نمایش سه‌بعدی این داده‌ها از نرم افزارهای EKKO-Mapper و EKKO-3D استفاده شده است.

مقاطع عمقی منطقه برداشت که با استفاده از نرم افزار EKKO_Mapper به دست آمده در شکل ۵-۴ نمایش داده شده است. برای به دست آوردن این مقاطع از پردازش‌های DEWOW، مهاجرت به ازاء ۰/۱ متر بر نانو ثانیه و نهایتا بهره اتوماتیک استفاده گردید.



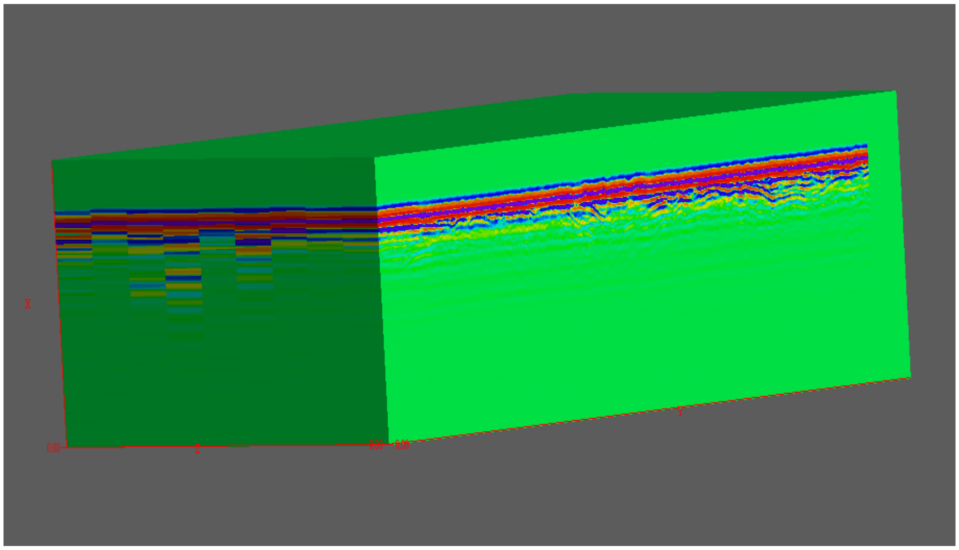
شکل ۵-۴: میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای اعماق الف) ۰ تا ۰/۵، ب) ۰/۵ تا ۰/۹۹، ج) ۰/۹۹ تا ۱/۴۹، د) ۱/۴۹ تا ۱/۹۹، ه) ۱/۹۹ تا ۲/۴۸ و و) ۲/۴۸ تا ۲/۹۸

این ۶ مقطع تا عمق تقریبی ۳ متر را مورد بررسی قرار داده است. میانگین دامنه سیگنال برای هر بخش از این شکل در بالای آن نوشته شده است. با توجه به بررسی‌های قبلی مشخص شد

که قنات در عمقی در حدود ۰/۴ تا ۰/۹ متر قرار دارد. در نتیجه در تفسیر این مقاطع تمرکز بر روی شکل "ب" از شکل ۵-۴ که میانگین دامنه سیگنال را برای عمق ۰/۹۹ – ۰/۵ متر نشان می‌دهد، گذاشته شد. در این مقطع اثر واضحی از قنات مشاهده نمی‌شود. دیگر مقاطع نیز حالتی مشابه با مقطع "ب" دارند. دلیل عدم موفقیت این مقاطع در نمایش قنات را باید در نبود تباین کافی برای تفسیر به وسیله این نرم افزار دانست. نرم افزار EKKO_Mapper در نمایش پدیده‌هایی چون لوله‌های فلزی که تباین بالایی با محیط اطراف خود دارند، موفق نشان می‌دهد [حسینی، ۱۳۸۸].

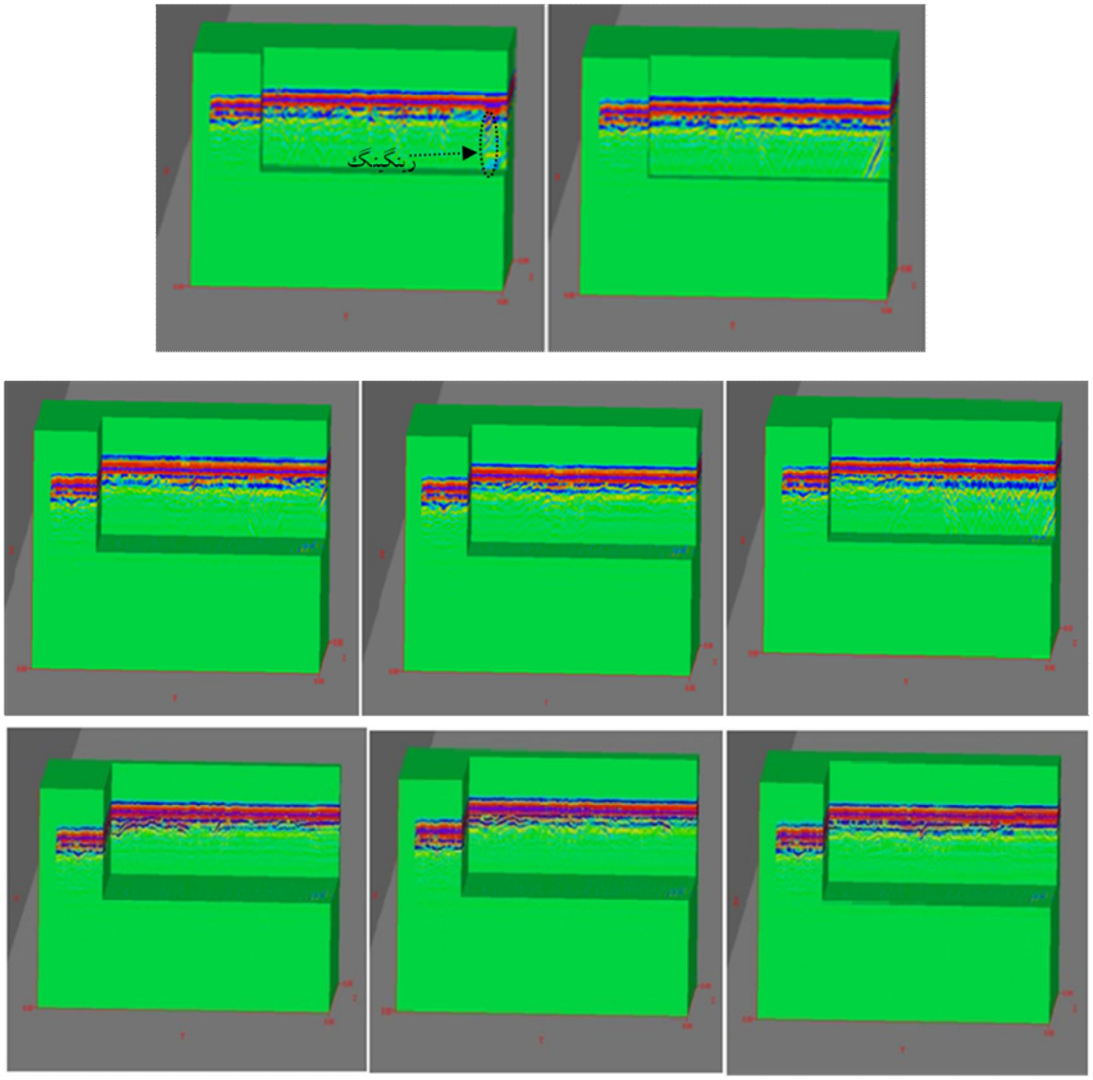
در این مقاطع تنها می‌توان به بررسی بعضی از قسمت‌ها که عمق نفوذ بالایی دارند و در مقاطع عمیق‌تر همچنان اثر خود را نشان می‌دهند (۵ – ۰ متری جهت x و ۳۵ – ۲۵ متری جهت y) اشاره کرد. این مناطق احتمالا دارای دانه بندی با ابعاد ذرات بزرگتر و نسبت رس کمتری نسبت به دیگر قسمت‌ها می‌باشند.

تفسیر سه‌بعدی داده‌های GPR به وسیله نرم افزار EKK_3D نیز انجام پذیرفت که مقطع سه‌بعدی آن در شکل ۵-۵ به وسیله نرم‌افزار T3D نمایش داده شده است. برای نمایش این مقطع از فیلتر DEWOW و بهره اتوماتیک استفاده گردید.



شکل ۵-۵: مقطع سه‌بعدی (3D) داده‌های برداشت شده با استفاده از نرم افزار EKKO_3D

در شکل ۵-۶ نیز برش‌های عرضی مقطع EKKO_3D به نمایش درآمده است. نکته جالبی که توجه را به خود جلب می‌کند نفوذ بسیار بالای قسمت‌های ابتدایی دو پروفیل اول در این مقاطع می‌باشد. در پروفیل دوم حتی پدیده رینگینگ قابل مشاهده می‌باشد، این پدیده در برداشت‌های GPR به دلایلی مانند عدم کوپلینگ مناسب آنتن رادار با زمین یا وجود حفرات زیرسطحی، کابل‌ها و لوله‌های فلزی مدفون و همچنین در مرز خاک هوازده شده با هوازده نشده مشاهده می‌شود. از آنجایی که در این محل لوله و یا کابل وجود نداشته و برداشت نیز با دقت بالایی صورت گرفت، احتمال وجود حفرات هوا و یا خاک هوازده نشده در این بخش زیاد است. این قسمت‌ها در تفسیر توموگرافی الکتریکی مشکل آفرین شده بود تا جایی که احتیاج به حفاری نیز برای اطمینان از معتبر بودن تفسیر احساس می‌شد. اما با تفسیر سه‌بعدی GPR احتمال وجود حفره هوا و یا سنگ هوازده نشده به شدت تقویت گردید. در این بخش این دو روش به خوبی با یکدیگر هم‌پوشانی کرده‌اند و عدم اعتماد به تفسیر تا حدود زیادی مرتفع گردیده است.



شکل۵-۶: برش‌های عرضی از مقطع سه‌بعدی. پروفیل‌های ۱ تا ۹ از بالا سمت راست تا پایین

فصل ششم

بحث، نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

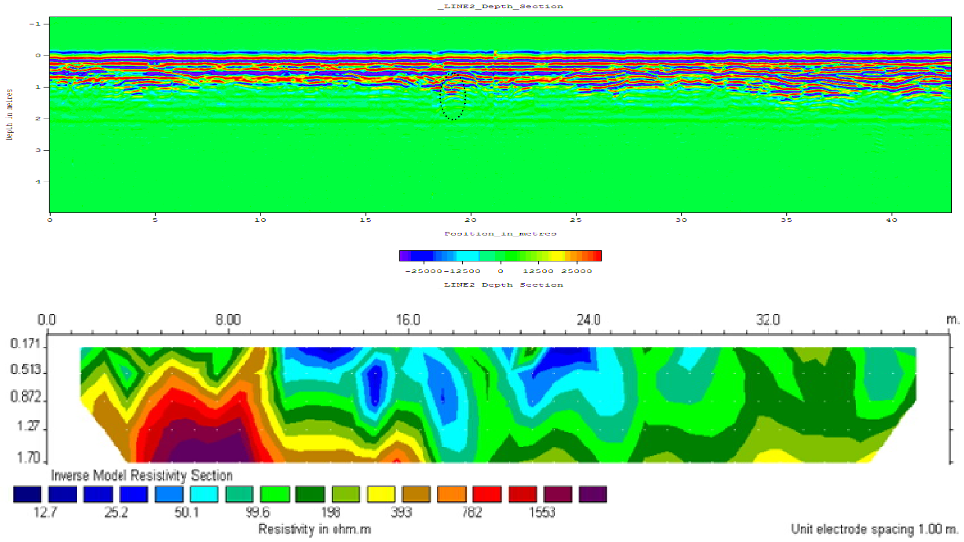
۶-۱- بحث و نتیجه‌گیری

۱ – اولین نتیجه‌گیری که در تفسیر داده‌های صحرایی به دست آمد، وجود آبرفت دانه متوسط به عنوان پوشش غالب در منطقه مورد بررسی است. داده‌های توموگرافی الکتریکی در نشان دادن این نتیجه گیری به مراتب قوی‌تر از روش GPR می‌باشد. به طوری که داده‌های GPR تنها عمق نفوذ کمی را نشان می‌داد ولی میزان مقاومت ویژه غالب در پروفیل‌ها و دانستن زمین شناسی به وضوح به آبرفتی بودن منطقه اشاره دارد.

۲ – سرعت برداشت داده‌های GPR به مراتب بالاتر از برداشت توموگرافی الکتریکی است. نیروی انسانی لازم برای برداشت GPR نیز کمتر از برداشت توموگرافی الکتریکی می‌باشد. در این بررسی تمام برداشت‌های GPR در زمانی در حدود ۱ روز و تنها به وسیله یک نفر انجام پذیرفت. اما برای برداشت‌های توموگرافی الکتریکی در حدود ۸ روز زمان صرف شد و برای برداشت داده‌های آن نیز حداقل به ۳ نفر نیروی مجرب احتیاج بود. این موضوع برای برداشت‌هایی که مسئله زمان و هزینه اهمیت دارد، باید مورد توجه قرار داده شود.

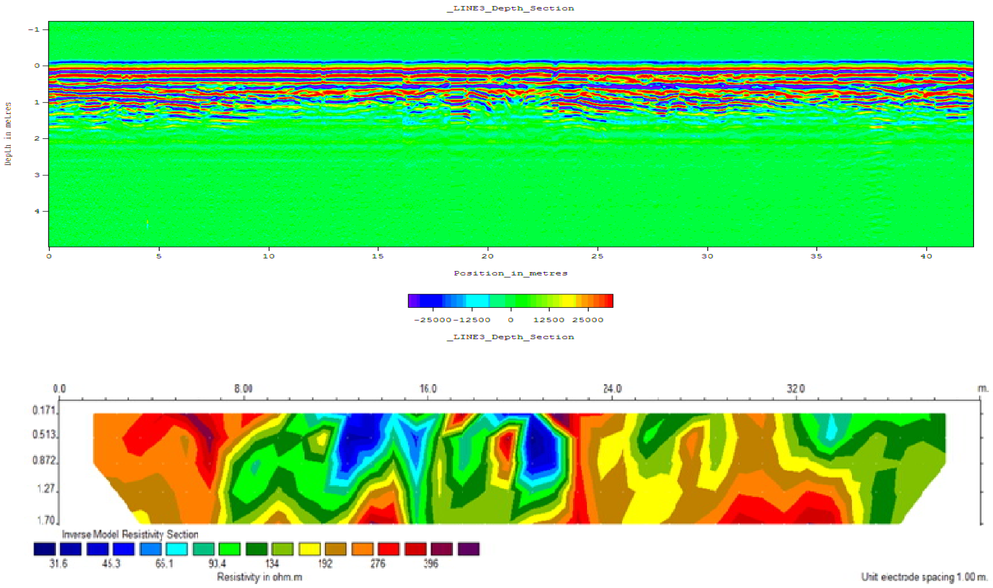
۳ – هر دو روش به نوع خاصی اثر قنات را نشان می‌دهند. در برداشت‌های مقاومت ویژه، قنات در غالب مجموعه ای از بتن، هوا و آب با مقاومت ویژه بالاتر از اطراف مشخص می‌شود و در داده‌های GPR نیز قنات به واسطه تفاوت خواص دی الکتریک با محیط اطراف مشخص می‌شود.

۴ – قدرت تفکیک روش GPR به مراتب بیشتر از روش توموگرافی الکتریکی است. این نتیجه گیری به وضوح در شکل ۶-۱ که مقطع پروفیل ۲ با دو روش GPR و توموگرافی است، قابل مشاهده می‌باشد.



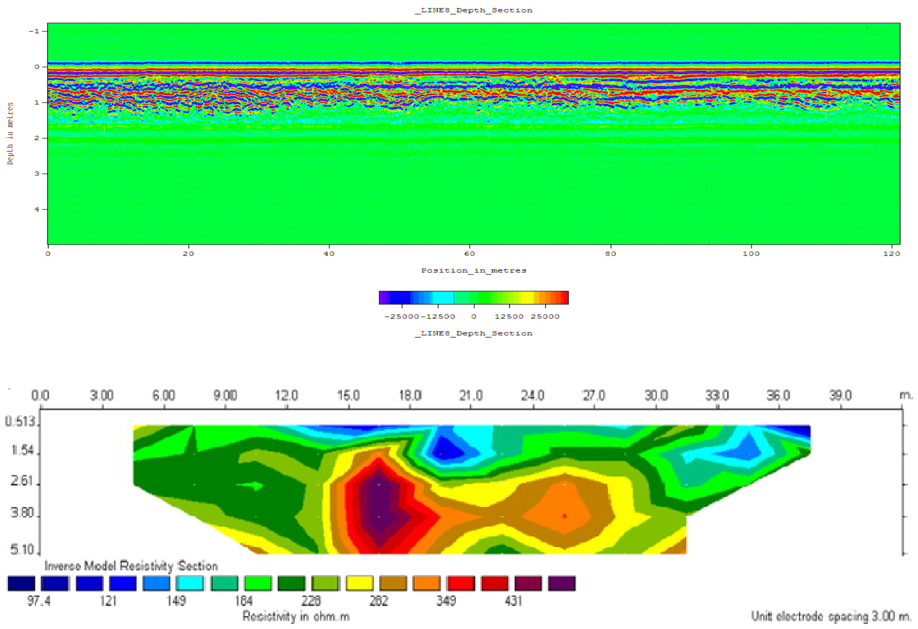
شکل ۶-۱: نمایش قنات با مقطع مدل سازی GPR و توموگرافی الکتریکی در پروفیل ۲

۵ – هر دو روش افزایش ابعاد ذرات، افزایش میزان رس و یا نفوذ رطوبت را با انطباق خوبی نشان می‌دهند. شکل ۶-۲ مقاطع حاصل از مدل‌سازی پروفیل ۳ می‌باشد. در این شکل نفوذ رطوبت در اطراف قنات در هر دو روش به وضوح قابل تشخیص است. در روش GPR افزایش ابعاد ذرات و وجود خلل و فرج هوا با افزایش عمق نفوذ و بالا رفتن رس یا نفوذ رطوبت با کاهش عمق نفوذ مشخص می‌شود. روش توموگرافی الکتریکی نیز افزایش ابعاد ذرات و حفرات هوا را با افزایش مقاومت ویژه، و بالا رفتن رس و یا نفوذ رطوبت را با کاهش مقاومت ویژه نمایش می‌دهد.



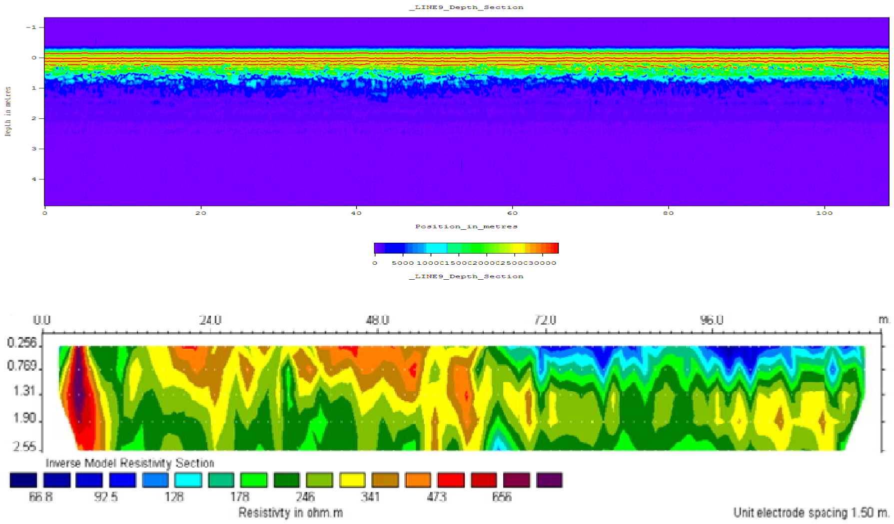
شکل ۶-۲: بررسی تاثیر ابعاد ذرات، میزان رس و رطوبت بر روی مقطع GPR و توموگرافی الکتریکی از پروفیل ۳

۶ – با افزایش عمق قنات به بیش از ۱/۵ متر داده‌های GPR قادر به نمایش قنات نیستند در حالیکه مقاطع توموگرافی الکتریکی هم‌چنان به خوبی اثر قنات را مشخص می‌کند. شکل ۶-۳ مقطع عمقی پروفیل ۸ را نشان می‌دهد. در مقطع توموگرافی این پروفیل اثر قنات به وضوح قابل تشخیص است در حالی که اثری از قنات در مقطع GPR مشاهده نمی‌شود. در این بررسی عمق نفوذ روش توموگرافی الکتریکی بیش از روش GPR است. کم بودن عمق نفوذ روش GPR را می‌توان مهم‌ترین نقطع ضعف این روش دانست.



شکل ۶-۳: توانایی دو روش GPR و توموگرافی الکتریکی در نمایش قنات در عمق بالا برای پروفیل ۸

۷ – روش GPR به نوعی بهترین روش ژئوفیزیکی در نمایش لایه بندی زیرسطحی کم عمق است. در این بررسی نیز مقاطع GPR به راحتی لایه بندی زیرسطحی و ضخامت آنها را نمایش می‌دهد در حالی که روش توموگرافی الکتریکی و مخصوصا آرایه دوقطبی- دوقطبی قادر به نمایش لایه‌بندی نمی‌باشد. شکل ۶-۴ قدرت هر دو روش را برای پروفیل ۱۰ در نمایش لایه بندی نشان می‌دهد. روش GPR به وضوح لایه بندی زیرسطحی و تغییر ضخامت این لایه‌ها را نشان می‌دهد، اما از مقطع توموگرافی الکتریکی نمی‌توان هیچ نتیجه گیری را در رابطه با لایه بندی به دست آورد.



شکل ۶-۴: بررسی تعیین لایه بندی برای روش GPR و توموگرافی الکتریکی برای پروفیل ۱۰

۸ – وجود عوارض کوچک سطحی و همچنین توپوگرافی‌های کوچک، برداشت GPR را با مشکل روبرو می‌کند و حتی در پروفیل‌های ۱۱ و ۱۲ غیر ممکن کرده است. این عوامل تاثیر چندانی بر برداشت و داده‌های توموگرافی الکتریکی ندارند.

۹ – در تفسیر سه‌بعدی (3D) توموگرافی الکتریکی نفوذ آب به اطراف قنات بهتر از خود قنات نمایش داده شده است. قنات آب نیز به دلیل فواصل پروفیل نسبتا زیاد به وضوح قابل تشخیص نیست.

۱۰ – به دلیل سهولت و سرعت بیشتر برداشت‌های GPR، فواصل بین پروفیل‌های برداشتی برای مدل‌سازی سه‌بعدی در این روش نصف روش توموگرافی الکتریکی است که باعث مدل‌سازی جزئی‌تر شود.

۱۱ – در مدل‌سازی سه‌بعدی افزایش مقاومت ویژه در نزدیک مبدا مقطع توموگرافی الکتریکی مشاهده شد که در تفسیر وجود حفرات هوا و یا سنگ هوازده نشده احتمالی تفسیر شد. پدیده رینگینگ در مقطع GPR برای این قسمت‌ها به نوعی تایید کننده این تفسیر می‌باشد.

۶-۲- پیشنهادات

۱- از آنجایی که در بعضی قسمت‌ها احتمال وجود حفره وجود دارد برداشت روش میکروگرانی متری می‌تواند به عنوان یک روش ژئوفیزیکی مکمل به بهبود تفسیر کمک کند.

۲- حفاری در برخی قسمت‌ها می‌تواند اطمینان تفسیر را بالا برده و ابهامات موجود را برطرف نماید.

۳- به دلیل ابعاد کم قنات برداشت داده‌های توموگرافی الکتریکی با فاصله الکترودی کوچک‌تر می‌تواند در نشان دادن واضح‌تر قنات کمک شایانی کند. البته با کاهش فاصله الکترودی با مشکل عمق نفوذ کم روبرو خواهیم شد.

۴- به علت تاثیر آنتن فرستنده GPR بر روی قدرت تفکیک و عمق نفوذ برداشت‌ها، بهتر است تا از فرستنده‌های با فرکانس دیگری نیز استفاده شود تا تاثیر فرکانس‌ها بر نمایش بهتر قنات نیز بررسی شود.

۵- برای مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های توموگرافی الکتریکی بهتر است تا فواصل بین پروفیل‌ها کاهش یابد تا کیفیت مدل‌سازی بهبود یابد.

۶- برای پرهیز از اتلاف زمان استفاده از دستگاه مولتی الکترود برای برداشت توموگرافی بسیار مفید خواهد بود.

فصل هفتم

منابع و مراجع

۱. حسینی، م، ۱۳۸۸، پایان نامه کارشناسی ارشد، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه مزبور، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۲. عشقی، ح، ۱۳۸۹، پایان نامه کارشناسی ارشد، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی ساختارهای زیر سطحی در منطقه جنوب شرقی دریاچه خزر، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۳. کرمی، غ.، ۱۳۷۷، منابع آب شهرستان شاهرود، کتاب شاهرود و توسعه

۴. محمدی ویژه، م، ۱۳۸۷، 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، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۵. مزینانی، ا، ۱۳۸۹، پایان نامه کارشناسی ارشد، بررسی ضخامت آسفالت در دانشگاه صنعتی شاهرود با استفاده از روش GPR، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

۶. میلفورد، ر،ج، ر.، کریستی، ف،ج ،رابرت .و.، ترجمه جمشیدی. م. (۱۳۷۰)"مبانی نظریه الکترومغناطیس" ، مرکز نشر دانشگاهی، تهران.

۷. نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ شاهرود، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی

۸. ولایتی، م، ۱۳۷۴، جغرافیای آب‌ها و مدیریت منابع آب، انتشارات خراسان، فصل چهارم، ۲۰۸-۲۰۳

9. Annan, A. P., 2001, Ground penetrating radar workshop note: Sensors and software.

10. Asfahani, J., 2007, Neogene aquifer properties specified through the interpretation of electrical sounding data, Salamieyeh region, Geology Department, Atomic Energy Commission, Syria., pp. 2934-2943.

11. Beauvais, A., Ritz, M., Parisot, J.C., Bantsimba, C., Dukhan, M., 2003, Combined ERT and GPR method for Investigtion two-stepped lateritic weathering systems, Geoderma 119, 121-132

12. Blindow, N., Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H., Richter, Th, ….., Ground penetrating radar, Environmental Geology, 4 Geophysics.

13. Cao, Y., Guzina, B., Labuz, J., 2008, pavement evaluation using ground penetrating radar. Minnesota department of transportation office of material and road research. 13-25

14. Corvallis, O. R., 2000, D.C. Resistivity methods, Northwest Geophysical Associates, Inc.

15. Dahlin, T., Loke, M.H., 1998. Resolution of 2D Wenner resistivity techniques. Proceedings of the 3rd meeting of Environmental and Engineering Geophysics Society. 143-146

16. Dahlin, T ., Zhou, B, 2001 . A numerical comparison or 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. Geophysical Prospecting, 52, 379-398

17. Daniels, J.J., 1996, Surface Penetrating Radar. The Institution of Electrical Engineers, London

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

19. De Loor, P.G., 1983, The dielectric properties of wet materials. IEE Transaction on Geosience and Remote sensing, Ge-21, 3, 364-369

20. Domenico, P. A., Schwartz, F. W., 1998, Physical and Chemical Hydrogeology, Vol 1, second edition, John Wiley & Sons, Inc., New York.

21. Ginzburg, A., Levanon, A., 1976, Determination of a salt-water interface by electric resistivity depth soundings, Department of Environmental Sciences, Tel Aviv University, Ramat Aviv, Israel., pp. 561-568.

22. Griffiths D.H. and Barker R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. Journal of Applied Geophysics , 29, 211-226

23. Hanninen, P., …., Ground penetrating radar, dielectric and electric conductivity monitoring studies as geoindicators, …..

24. Kearey, P., Brooks, M., 1991, An introduction to Geophysical Exploration, Second edition: Blackwell science
25. Knight, R., 2001,Ground penetrating radar for environmental applications: Annu. Rev. Earth Planet. Sci, 29, 229-255
26. Knodel, K., Lange, G., Voigt, H.J., 2007, Environmental Geology, Springer, pp.283
27. Knoll, M.D., Knight, R., 1994, Relation between dielectric and hydrogeologic properties of sand-clay mixture. Proceeding of the 5th International Conference on Ground penetrating radar. Kitchener, Ontario. 45-61
28. Leucci, G., 2005, Contribution of Ground Penetrating radar end Electrical Resistivity Tomography to identify the caviy and fractures under the main Cheurch in Botrugno (Lecce, Italy), Journal of Archaeological Science, 33, 1194-1204
29. Leucci, G., Margiotta, S., Negri, N., 2004, Geophysical and Geological Investigations in a Karstic Environment (SaliceSalentino, Lecce, Italy), Journal of Environmental and Engineering Geophysics, vol 09, 25-34
30. Li, Y., Oldenburg, D.W,. 1992. Approximate inverse mapping in DC resistivity problems. Geophysical Journal International 109, 343-362
31. Loke, M.H., 1999, Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys: ABEM
32. Loke, M.H., 2004, 2-D and 3-D electrical imaging surveys.
33. Loke, M,H., Barker, R,D., 1995, Least-squares deconvolution fo apparenr resistivity pseudosections, Geophydics, 60, 1682-1690
34. Loke M.H., Barker, R.D., 1996a. Rapid least-square inverson of apparent resistivity pseudosections using a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, 131-152
35. Loke, M.H., Barker, R.D., 1996b., Practical techniques for 3d resistivity surveys and data inversion. Geophysical Prospecting, 44, 499-523
36. Marescot, L., 2009, Electrical Surveing [Part 2], www.tomoquest.com
37. Marescot, L., Engineering and environmental geophysics. www.tomoquest.com, 13-20

38. Molano, E,. Salamanca, M,. Van Overmeeren, A,. 1990. Numerical modelling of standard and continuous vertical electrical soundings. Geophysucal Prospecting. 38, 705-89
39. Moller, I., 2006, Inglise Moller, Burval, pp.99
40. Muiuane, E.A,. Padersen, L.B,. 1999. Automatic 1D interpretation of DC resistivity sounding data. Journal of Applied Geophysics. 42, 35-45
41. Neal. A., 2003, Ground penetrating radar and its use in sedimentology. principles , problems and progress, School of Applied Sciences, University of Wolverhampton.
42. Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress: Earth-science reviews, 66, 261-330
43. Ogilvy, R.,Chambers, R., Meldrum, Ph., Kuras, O., Wilkinson, P. 2008 Advances in geoelectric imaging technologies for the measurement and monitoring of complex earth systems and processes,.
44. Ortiz, D.G., Velazquez, S.M., Crespo, T.M., Marquez, A., Lillo, J,. Lopez, I., Carreno, F., Gonzalez, F.M., Herrera, R., De Pablo, M.D., 2007, Joint application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging to investigation volcanic materials and structures in Tenerif (Canary Islands, Spain), Journal of Applied Geophysucs, 62, 287-300
45. Parasnis, D.S., 1997, Principles of applied geophysics, 5th edition: Chapman and Hall
46. Park, S.K., Van, G.P., 1991, Inversion of pole-pole data for 3-D resistivity structures beneath arrays of electrodes. Geophysics, 56, 951-960
47. Qady, G., Hafez, M., Abdalla, M.A., Ushijima, K., 2005, Imaging subsurface cavities using geoelectrical tomograohy and ground penetrating radar, Journal of Cave and Karst Studies, 67, 174–181
48. Renolds, J.K., 1997, An introduction to Applied end Environmental Geophysics. John Wiley and Sons. 796 pp.
49. Saarenketo, T., 1995, The use of dielectric and electric conductivity measurment and ground penetrating radar for frost susceptibility evaluation of subgrade soils, Proc. Sageep’95, 73, 73-85

50. Sasaki, Y,. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. Geophysical Prospecting, 40, 453-464
51. Scott, M., Gagarin N., Mills, M.k., Oskard M.,……, Step ferequancy GPR eveluation of the Natchez trace tarkway: Pavement and infrastructure measurement and assessment for FHWA digital haghway measurment vehicle application
52. Sensor and Sofware, 1999, EKKO_Mapper User's Guide, Version 2.0
53. Sensor and Sofware, 1999, Ground penetrating radar survey design
54. Sensor and Sofware, 1999, NOGGIN smart system Users Manual. Version 1.1
55. Sensor and Sofware, 1999, EKKO_3D User's Guide, Version 2.0
56. Sensor and Sofware, 1999, Win_EKKO User's Guide, Version 1.0
57. Shafri, H.Z.M., Abdollah, R.S.A., Roslee, M., Numiandy, R., 2008, Optimization fo ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pevement density data analysis. IGARSS,USA
58. Smith, DG., Jol, HM, 1995, Ground penetrating radar: antenna frequancies and maximum probable depths of penetration in Guaternary sediments. Journal of Applied Geophysics
59. Van Dam, R.L., Schlager, W., 2000, Identifying causes of ground-panetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses, sedimentology, 47, 435-449
60. Wensink, C.G., 1993, Dielectric properties of wet soils in the frequancy range 1-3000 MHz. Geophysical Prospecting, 41, 671-696
61. Wisen, R., Auken, E., Dahlin, T….. Comparison of 1D laterally constrained inversion and 2.5D inversion of CVES resistivity data with drilling data as apriori information
62. www.Googleeath.com
63. www.Maps.Google.com
64. www.ngdir.ir
65. www.UBC.ca
66. Zeng, X., McMechan, G.A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes, Geophysics, 62, 798-806

67. Zhou, B., greenhalgh, S.A., 2002, Rapid 2-D/3-D crosshole resistivity imaging using the analytic sensitivity function, Geophysics, 67, 755-765