

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه
شاهرود و مقایسه نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه مزبور

دانشجو

مسعود حسینی

استاد راهنما

دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی

استاد مشاور

مهندس مهدی محمدی ویژه

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۸۸



پایان نامه کارشناسی ارشد مسعود حسینی
 تحت عنوان: برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و
 مقایسه نتایج آن با نتایج ژئومغناطیس در منطقه مزبور
 در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی
 اکتشاف معدن مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش
 قرار گرفت.

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

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	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 مهربانم

تقدیر و تشکر

ممد و سپاس فقط شایسته ذات اوست.

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

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

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

چکیده

امروزه انتقال و نگهداری مواد سوختی، آب و همچنین سایر منابع انرژی توسط لوله‌ها، مخازن و کابل‌های مدفون در زیر سطح زمین در مناطق شهری و بین شهری امری ضروری و مهم است، به طوری که باعث ایجاد شبکه‌های زیرزمینی عظیم با صرف هزینه‌های فراوان شده است. مسئله‌ای که پس از ایجاد چنین شبکه‌هایی دارای اهمیت خاصی است، نگهداری و پشتیبانی از این سازه‌های دست بشر برای جلوگیری از تخریب‌های احتمالی می‌باشد. این تخریب‌ها دور از چشم و در عمق کم صورت می‌گیرد و باعث ایجاد ضررهای مالی و همچنین آلودگی‌های جبران ناپذیر زیست محیطی می‌شوند. از این رو برای نگهداری از این سازه‌ها می‌توان از روشهای ژئوفیزیکی بهره گرفت. سازه‌های ایجاد شده دست بشر مدفون در عمق کم دارای تباین خوبی از نظر خواص فیزیکی با محیط اطرافشان هستند، از این رو اهداف مناسبی برای آشکارسازی توسط روش GPR محسوب می‌شوند. در این تحقیق به پردازش و تفسیر داده‌های برداشت شده توسط روش GPR بر روی لوله‌های مدفون در زیر سطح زمین از جمله لوله‌های فلزی انتقال گاز پرداخته شده است. برای درک مزایا و معایب روش GPR، سعی شده است نتایج حاصل از استفاده از این روش را با نتایج به دست آمده از پردازش و تفسیر داده‌های برداشت شده توسط روش مغناطیس‌سنجی بر روی همان اهداف در آن منطقه مقایسه شوند.

روش GPR دارای قدرت تفکیک بالایی نسبت به روش مغناطیس‌سنجی است، اما امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی با رسانندگی الکتریکی بالا به شدت مستهلک شده و عمق نفوذ این روش محدود می‌شود، به طوری که در مقاطع عمقی به دست آمده مشاهده می‌شود که عمق نفوذ به کمتر از ۲ متر هم در منطقه می‌رسد. روش مغناطیس‌سنجی علی‌رغم تفکیک‌پذیری ضعیف، در چنین محیط‌هایی در آشکارسازی اهدافی که دارای تباین خوبی در خواص مغناطیسی با محیط اطراف خود هستند، موفق‌تر عمل کرده است. در مکان‌های شهری که محیط‌هایی با نوفه بالا هستند، امکان برداشت مغناطیس‌سنجی وجود ندارد، در حالی که روش GPR با آنتن پوششی در چنین محیط‌هایی می‌تواند به خوبی عمل کند. امکان برداشت شبکه‌ای و ایجاد نقشه‌های سه‌بعدی و مقاطع عمقی سه-

بعدی با دقت بالا، اطلاعات فراوان، مفید و دقیقی را از اهداف زیرسطحی مدفون در منطقه برداشت در اختیار ما قرار می‌دهد که در نهایت موجب تفسیر دقیق و مطمئنی از داده‌های به‌دست آمده می‌شود. اهدافی که در این پایان‌نامه دنبال می‌شود آشکارسازی لوله‌های گاز و اهداف نزدیک سطح توسط روش GPR در منطقه قلعه شوکت شاهرود و مقایسه آن با داده‌های برداشت شده توسط روش مغناطیس‌سنجی در این منطقه است. نتایج به‌دست آمده از این مقایسه نشان می‌دهد که روش GPR به عنوان یک روش با قدرت تفکیک بالا در آشکارسازی بی‌هنجاری‌های با ابعاد کوچک نزدیک به هم و با عمق دفن‌شدگی کم بسیار موفق‌تر از روش مغناطیس‌سنجی عمل کرده است اما در بخشهایی از منطقه که رسانندگی بالاست، به دلیل استهلاک بالای امواج GPR این روش قادر به آشکارسازی اهداف زیرسطحی نبوده و در این موارد روش مغناطیس‌سنجی موفق‌تر عمل کرده است. یکی دیگر از کارهایی که در این تحقیق انجام شده است برداشت شبکه‌ای توسط GPR و بررسی سه‌بعدی داده‌ها می‌باشد. این برداشت در داخل دانشگاه صنعتی شاهرود صورت گرفته است و به دلیل پر نوفه بودن محیط قادر به برداشت با روش مغناطیس‌سنجی در این منطقه و مقایسه نتایج آن با نتایج به دست آمده از روش GPR نشده‌ایم. در نتیجه این برداشت، بررسی و آشکارسازی اهداف زیرسطحی منطقه با دقت و تفکیک‌پذیری بسیار خوب و ایجاد نقشه‌های سه‌بعدی شبکه با مشخص کردن اهداف زیرسطحی در عمق با دقت بالا صورت گرفته است. این نقشه‌های سه‌بعدی کمک چشم‌گیری به مفسر در تفسیر مطمئن و دقیق داده‌های GPR نموده و اطلاعات کامل و مهمی از منطقه در اختیار ما قرار می‌دهد. ایجاد مقاطع عمقی سه‌بعدی یکی دیگر از مزایای این روش است که در ارائه نتایج بسیار مفید بوده و نمایش داده‌ها به این شکل می‌تواند کمک زیادی به تجسم سه‌بعدی منطقه کرده و بدین ترتیب، نتایج بسیار ملموس‌تری به دست آید.

فهرست

فصل اول: مقدمه و کلیات

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

فصل دوم: تئوری روش GPR

- ۱-۲- مروری بر تاریخچه GPR..... ۱۱
- ۲-۲- تئوری روش GPR..... ۱۲
- ۱-۲-۲ اجزاء دستگاه و خواص موج الکترومغناطیس..... ۱۲
- ۲-۲-۲ انتشار، سرعت و جذب امواج GPR..... ۱۴
- ۳-۲-۲ انعکاس، عبور و انکسار در طی انتشار موج..... ۱۸
- ۴-۲-۲ قدرت تفکیک..... ۱۹

۲۱.....	۵-۲-۲ عمق نفوذ
۲۲.....	۳-۲- شيوه برداشت داده‌ها در دستگاه Noggin Plus
۲۲.....	۱-۳-۲ برداشت خطی
۲۳.....	۲-۳-۲ روش شبکه‌بندی
۲۴.....	۴-۲- پردازش داده‌های GPR
۲۴.....	۱-۴-۲ روال پردازش داده‌های GPR
۲۷.....	۵-۲- اساس کار تکنیک مهاجرت در واپیچش (دیکانولوشن)
۳۰.....	۱-۵-۲ مهاجرت

فصل سوم: مروری بر تئوری روش مغناطیس سنجی

۳۴.....	۱-۱-۳ ضریب مغناطیس پذیری یا پذیرفتاری مغناطیسی
۳۵.....	۲-۱-۳ مغناطیس سنگ‌ها و کانی‌ها
۳۶.....	۳-۱-۳ مغناطیس باقیمانده
۳۷.....	۲-۳- پردازش داده‌های مغناطیس
۳۷.....	۱-۲-۳ تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقیمانده
۳۸.....	۲-۲-۳ روش برگردان به قطب
۳۸.....	۳-۲-۳ گسترش رو به بالا
۳۹.....	۴-۲-۳ گسترش رو به پایین
۳۹.....	۵-۲-۳ روش روند سطحی
۳۹.....	۶-۲-۳ روش مشتق قائم
۴۰.....	۳-۳- تفسیر داده‌های مغناطیسی
۴۰.....	۱-۳-۳ تفسیر کیفی

۴۰.....	تفسیر کمی	۲-۳-۳
۴۰.....	روش پیشرو	۱-۲-۳-۳
۴۱.....	روش معکوس	۲-۲-۳-۳

فصل چهارم: برداشت‌های دوبعدی GPR و مغناطیس

۴۴.....	برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های GPR ناحیه قلعه شوکت	۱-۴
۴۵.....	پروفیل صفر	۱-۱-۴
۴۹.....	پروفیل ۱	۲-۱-۴
۵۱.....	پروفیل ۲	۳-۱-۴
۵۳.....	پروفیل ۳	۴-۱-۴
۵۴.....	پروفیل ۴	۵-۱-۴
۵۶.....	پروفیل ۵	۶-۱-۴
۵۸.....	پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس ناحیه قلعه شوکت	۲-۴

فصل پنجم: برداشت‌های سه‌بعدی GPR

۷۶.....	پروفیل‌های X برداشت شده در جهت شمالی-جنوبی شبکه	۱-۵
۷۶.....	پروفیل X0	۱-۱-۵
۸۳.....	پروفیل‌های Y برداشت شده در جهت غربی-شرقی شبکه	۲-۵
۸۳.....	پروفیل‌های Y0، Y1، Y2، Y4، Y5	۱-۲-۵
۸۶.....	پروفیل Y6، Y7، Y9 و Y10	۲-۲-۵
۸۹.....	برداشت در امتداد لوله‌های تأسیساتی	۳-۵
۹۲.....	بررسی و تفسیر سه‌بعدی شبکه برداشت شده	۴-۵

فصل ششم: بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۶ - بحث و نتیجه‌گیری ۱۰۱

۲-۶ - پیشنهادات ۱۰۴

فهرست اشکال

فصل دوم: تئوری روش GPR

- شکل ۱-۲: تعداد مقاله‌های چاپ شده GPR ۱۱
- شکل ۲-۲: معرفی اجزاء دستگاه GPR ۱۳
- شکل ۳-۲: شکل موجک قبل از (سمت چپ) و بعد از (سمت راست) بازتاب عمودی از فصل مشترک بین دو محیط ۱۹
- شکل ۴-۲: مقاطع زمانی GPR ۲۰
- شکل ۵-۲: برداشت خطی مستقیم (الف) ، برداشت خطی رفت و برگشت (ب) ۲۳
- شکل ۶-۲: برداشت شبکه‌ای مستقیم (الف) ، برداشت شبکه‌ای رفت و برگشت (ب) ۲۴
- شکل ۷-۲: نحوه برداشت داده‌ها به روش CMP (سمت چپ) و مقطع حاصل از برداشت CMP (سمت راست) ۲۶
- شکل ۸-۲: پردازش مهاجرت معکوس زمان ۲۹
- شکل ۹-۲: نقطه پراکنده‌ساز در موقعیت $(0, z_0)$ (الف)، داده‌های ثبت شده $b(x, t)$ (ب) ۳۰

فصل چهارم: برداشت‌های دوبعدی GPR و مغناطیس

- شکل ۴-۱: عکس هوایی از منطقه برداشت و پروفیل‌های GPR برداشت شده بر روی لوله گاز و خط تلفن در ناحیه قلعه شوکت ۴۵
- شکل ۴-۲: مقطع زمانی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۴۶
- شکل ۴-۳: مقطع عمقی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow ، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۴۷
- شکل ۴-۴: مقطع عمقی پروفیل یک با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۴۹
- شکل ۴-۵: مقطع عمقی پروفیل یک با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۴۹
- شکل ۴-۶: مقطع عمقی پروفیل دو با اعمال فیلتر Dewow ، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۱
- شکل ۴-۷: مقطع عمقی پروفیل دو با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از پردازش مهاجرت، بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۲
- شکل ۴-۸: مقطع عمقی پروفیل سه با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۳
- شکل ۴-۹: مقطع عمقی پروفیل سه با اعمال فیلتر Dewow و پردازش مهاجرت ، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۴
- شکل ۴-۱۰: مقطع عمقی پروفیل چهار با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۵
- شکل ۴-۱۱: مقطع عمقی پروفیل چهار با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۵

- شکل ۴-۱۲: مقطع عمقی پروفیل پنج با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۶
- شکل ۴-۱۳: مقطع عمقی پروفیل پنج با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی ۵۷
- شکل ۴-۱۴: نقشه مغناطیس کل ۵۹
- شکل ۴-۱۵: نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیس کل ۶۱
- شکل ۴-۱۶: نقشه مغناطیس ناحیه‌ای منطقه ۶۱
- شکل ۴-۱۷: نقشه مغناطیس باقیمانده برگردان به قطب ۶۲
- شکل ۴-۱۸: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۱ متر ۶۳
- شکل ۴-۱۹: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۲ متر ۶۳
- شکل ۴-۲۰: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۵ متر ۶۴
- شکل ۴-۲۱: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۱۰ متر ۶۴
- شکل ۴-۲۲: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل صفر ۶۵
- شکل ۴-۲۳: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۱ ۶۶
- شکل ۴-۲۴: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۲ ۶۷
- شکل ۴-۲۵: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۳ ۶۸

شکل ۴-۲۶: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۴..... ۶۹

شکل ۴-۲۷: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۵..... ۷۰

شکل ۴-۲۸: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۱ متر ۷۱

شکل ۴-۲۹: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۲ متر ۷۱

شکل ۴-۳۰: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۵ متر ۷۲

شکل ۴-۳۱: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۱۰ متر ۷۲

فصل پنجم: برداشت‌های سه‌بعدی GPR

شکل ۵-۱: تصویر هوایی از منطقه و محدوده شبکه برداشت شده در داخل دانشگاه صنعتی شاهرود مقابل دانشکده فنی مهندسی ۷۴

شکل ۵-۲: موقعیت شبکه برداشت به همراه موقعیت ساختارهای زیرسطحی در این منطقه ۷۵

شکل ۵-۳: مقطع زمانی (الف) و مقطع عمقی (ب) پروفیل X0 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۷۶

شکل ۵-۴: مقطع عمقی پروفیل X3 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۷۸

شکل ۵-۵: مقطع عمقی پروفیل X4 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۷۹

شکل ۵-۶: مقاطع عمقی پروفیل X1 (الف)، پروفیل X2 (ب)، پروفیل X5 (ج) و پروفیل X6 (د)، با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۸۰

شکل ۵-۷: مقطع عمقی پروفیل X7 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۸۱

شکل ۵-۸: مقاطع عمقی پروفیل X8 (الف)، پروفیل X9 (ب) و پروفیل X10 (ج)، با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۸۲

شکل ۵-۹: مقطع عمقی پروفیل Y0 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC ۸۳

شکل ۵-۱۰: مقطع عمقی پروفیل Y0 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۸۴

شکل ۵-۱۱: مقاطع عمقی پروفیل Y1 (الف)، پروفیل Y2 (ب)، پروفیل Y4 (ج) و پروفیل Y5 (د) با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۸۶

شکل ۵-۱۲: مقطع عمقی پروفیل Y6 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۸۷

شکل ۵-۱۳: مقاطع عمقی پروفیل‌های Y7 (الف)، Y9 (ب) و Y10 (ج) با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۸۹

شکل ۵-۱۴: مقطع عمقی پروفیل X7 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC ۹۰

شکل ۵-۱۵: مقطع عمقی پروفیل Y8 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC ۹۱

شکل ۵-۱۶: مقطع عمقی پروفیل Y3 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC ۹۱

شکل ۵-۱۷: میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای اعماق ۰ تا ۰/۴۹ متر (الف)، ۰/۴۹ تا ۰/۹۹ متر (ب) و ۰/۹۹ تا ۱/۴۸ متر (ج) ۹۳

شکل ۵-۱۸: میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای اعماق ۱/۴۸ تا ۱/۹۸ متر (الف)، ۱/۹۸ تا ۲/۴۷ متر (ب)، ۲/۴۷ تا ۲/۹۷ متر (ج)، ۲/۹۷ تا ۳/۴۶ متر (د)، ۳/۴۶ تا ۳/۹۶ متر (ه) و ۳/۹۶ تا ۴/۴۵ متر (و) ۹۵

شکل ۵-۱۹: مقطع عمقی 3D پروفیل‌های X با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۹۶

شکل ۵-۲۰: برش‌های عرضی از مقطع 3D پروفیل‌های X شبکه از بالا سمت چپ به پایین سمت راست به ترتیب پروفیل‌های X2 تا X10 ۹۷

شکل ۵-۲۱: مقطع عمقی 3D پروفیل‌های Y با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک ۹۸

شکل ۵-۲۲: برش‌های عرضی از مقطع 3D پروفیل‌های Y شبکه از بالا سمت چپ به پایین سمت راست به ترتیب پروفیل‌های Y10 تا Y2 ۹۹

فهرست جداول

فصل دوم: روش GPR

- جدول ۱-۲: مشخصات الکترومغناطیس مواد ۱۷

فصل سوم: روش مغناطیس سنجی

- جدول ۱-۳: پذیرفتاری مغناطیسی برخی از کانیها و سنگهای رسوبی ۳۵

فصل اول

مقدمه و کلیات

۱-۱- مقدمه

برای قرن‌ها بشر آرزوی امکان آشکارسازی اهداف و منابع زیرزمینی را داشته است. اکنون به جایی رسیده‌ایم که قادر به آشکارسازی جزئیات خطوط مدفون از قبیل لوله‌ها و کابل‌های ساخت دست بشر در مکانهای دفن شده هستیم [Usami, et al, 1986]. هدف اصلی در این مرحله معرفی یک روش مناسب، سریع و کم‌هزینه برای آشکارسازی موقعیت و عمق لوله‌ها و کابل‌های مدفون شده در زیر زمین است.

زمانی که ادارات برق و مخابرات، سازمان آب و شرکت گاز نیاز به ایجاد یک مسیر جدید از لوله یا کابل دارند و همچنین برای نگهداری از تأسیسات زیرسطحی، یک مشکل جدی مطرح می‌شود که برای حل آن به استفاده از روش‌های غیر مخرب و دقیق ژئوفیزیکی نیاز است. در هنگام خاکبرداری به منظور تعمیر خطوط لوله و کابل‌ها در مناطقی که تأسیسات زیرزمینی وجود دارد داشتن اطلاعات دقیق از محل و عمق دفن شدگی تأسیسات با جزئیات دقیق، بسیار ضروری است. عدم داشتن اطلاعات دقیق در هنگام خاکبرداری در منطقه مورد نظر باعث ایجاد خسارات پر هزینه و گاهاً جبران ناپذیر می‌شود. چندین روش مختلف برای کسب اطلاعات لازم از محل و عمق تأسیسات زیرزمینی وجود دارد که هر یک دارای معایبی هستند. این روش‌ها شامل روش‌های چشمی و روش‌های غیر چشمی هستند، از روش‌های چشمی می‌توان به ایجاد سوراخ آدم رو و شبکه فلزی اشاره کرد و همچنین روش‌های غیر چشمی شامل روش لرزه‌نگاری، روش مغناطیس سنجی، روش‌های مقاومت ویژه الکتریکی، ثقل سنجی و روش‌های الکترومغناطیس می‌باشد.

روش رادار نفوذی به داخل زمین (GPR) یکی دیگر از روش‌های آشکارسازی اهداف مدفون است که در حوزه روش‌های الکترومغناطیس طبقه‌بندی می‌شود. هدف از این تحقیق بررسی مزایا و معایب روش (GPR) و معرفی این روش به عنوان بهترین روش برای آشکارسازی موقعیت لوله‌ها و کابل‌های مدفون و همچنین بدست آوردن عمق دقیق دفن شدگی این اهداف با استفاده از اعمال پردازش مهاجرت بر داده‌های GPR است. تاکنون روش‌های ژئوفیزیکی فراوانی برای مطالعات زیرسطحی مورد استفاده قرار گرفته است.

در این میان یکی از روشهای با قدرت تفکیک^۱ بالا، روش رادار نفوذی به زمین^۲ و یا به طور مختصر GPR می باشد. رادار که خود مخفف عبارت دیگری است^۳، سیستمی است که از پالس^۴های کوتاه الکترومغناطیس بهره می برد. این روش در انتشار امواج الکترومغناطیس به درون زمین و همچنین شیوه پردازش و تفسیر داده ها، شباهت زیادی با روش لرزه نگاری بازتابی دارد [www.malags.com] [www.sensoft.ca]. استفاده از امواج الکترومغناطیس با فرکانس بالا جهت بررسی های زیر سطحی برای اولین بار به مطالب و اختراعات آلمان در سال ۱۹۰۴ توسط هولسمیر^۵ باز می گردد [Parasnis, 1997]. تا قبل از اختراع رادار به نظر نمی رسید که مطالبی از این دست باعث به وجود آمدن سیستم های قابل استفاده جهت بررسی های زیرسطحی توسط امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا شوند. استفاده از این ابزار از سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه یافت. گستره وسیع کاربردهای این روش علاوه بر قدرت تفکیک بالای آن، سرعت قابل ملاحظه در برداشت داده ها و همچنین غیر مخرب بودن آن، همگی از مزایا و همچنین دلایل توسعه آن در این سال ها محسوب می شود.

۱-۲- کاربردهای روش GPR

امروزه توسعه شبکه های تأسیساتی و رفاهی به واسطه گسترش شهرها و جمعیت آنها، امری اجتناب ناپذیر به نظر می رسد. این امر نیاز روز افزون بشر به بهره وری از محیط های زیرسطحی را سبب شده است. کانال ها و آبراهه ها، شبکه های آب و فاضلاب شهری، لوله های انتقال گاز و خطوط ارتباطی مدفون در خاک از جمله تأسیساتی هستند که عموماً نقشه های دقیق و به روز از محل دفن آنها در دسترس نیست. ساخته شدن این تأسیسات توسط شرکت ها و پیمانکاران مختلف و عدم آگاهی از محل دفن این گونه ساختارها، طراحی و ساخت شبکه های جدید را مشکل و پیچیده می کند. از طرفی آگاهی از توزیع شبکه های تأسیساتی به منظور مدیریت شبکه و نیاز به تعمیر و نگهداری از شبکه های

¹ Resolution

² Ground penetrating radar

³ Radio detection and ranging

⁴ Pulse

⁵ Hulsmeier

با طول عمر بالا، تعیین محل دقیق این گونه ساختارها را بسیار پراهمیت ساخته است. همچنین در محیط‌های شهری، اغلب روش‌های ژئوفیزیک به دلیل وجود محدودیت‌های مکانی و نوفه‌های محیطی با مشکل روبرو هستند و در پاره‌ای از موارد امکان استفاده از آنها وجود ندارد. در این راستا به منظور کاهش اختلالات ناشی از حفاری‌های بی مورد در مناطق شهری، روش‌های غیر مخرب مورد توجه بسیاری از مهندسان تأسیسات قرار گرفته است. در این گونه محیط‌ها با استفاده از GPR بدون داشتن اثرات نامطلوب در محیط برداشت، داده‌ها را با سرعت بالایی می‌توان برداشت کرد. در این میان روش GPR به عنوان یکی از روش‌های نوین ژئوفیزیک نزدیک سطح، موفقیت‌های قابل توجهی حاصل کرده و در سال‌های اخیر مطالعات بسیاری در این خصوص در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است. دستگاه‌های GPR با تولید و انتشار پالس‌های ناپیوسته الکترومغناطیس در محیط‌های زیرسطحی، ناپیوستگی‌های الکتریکی را آشکارسازی می‌کنند. شکل و پهنای باند فرکانس پالس GPR تابعی از مشخصات آنتن مورد استفاده برای تولید این پالس‌ها است. عموماً این آنتن‌ها را با توجه به فرکانس مرکزی پالس تولید شده، نام‌گذاری می‌کنند. انتخاب آنتن‌ها برای برداشت، با در نظر گرفتن شرایط زیرسطحی، مشخصات هدف مورد مطالعه (هندسه و ابعاد)، عمق نفوذ و قدرت تفکیک مورد نظر تعیین می‌گردد.

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

موارد استفاده از روش GPR بسیار متعدد و تعداد مقالات در زمینه استفاده از این روش و کاربردهای آن بسیار زیاد است. مطالعات کاربردی و تحقیقاتی در زمینه GPR نزدیک سه دهه است که در نقاط مختلف دنیا آغاز شده و تا به امروز به طور فزاینده‌ای ادامه داشته است. در زمینه خاک‌های یخ‌زده و منجمد، که یکی از اولین مطالعات انجام شده با روش GPR است، می‌توان به مطالعات آنان^۱ و دیویس^۲ به سال ۱۹۷۶ اشاره کرد [Annan, 2001]. این دو محقق مطالعاتی نیز در زمینه چینه-

^۱ Annan

^۲ Davis

شناسی خاک و همچنین شکستگی‌های درون سنگ‌های آذرین به سال ۱۹۸۹ [Davis & Annan, 1989]، داشته‌اند. در خصوص آب‌های زیرزمینی و آشکارسازی سطح ایستابی مطالعه ون اور میرن^۱ به سال ۱۹۹۴ از مطالعات موفق GPR در زمینه آب‌های زیرزمینی است [van Overmeeren, 1994]. در این مطالعه پاسخ‌های متفاوت به‌دست آمده با استفاده از آنتن‌های با فرکانس مرکزی مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. از نتایج این مطالعه می‌توان به آشکارسازی بهتر سطح ایستابی در فرکانس‌های پایین اشاره کرد. علاوه بر این GPR حتی در آشکارسازی ناپیوستگی‌های سطح ایستابی نیز موفق عمل کرده است. در خصوص کاربردهای GPR در آلودگی‌های زیرسطحی ناشی از آلودگی‌های هیدروکربوری و آشکارسازی نحوه انتشار این آلودگی‌ها در شرایط آزمایشگاهی می‌توان به مطالعه نایت^۲ به سال ۲۰۰۱ اشاره کرد. این بررسی از جمله مطالعات GPR در زمینه مطالعات زیست محیطی است [Knight, 2001]. تفسیر کمی داده‌های GPR در این‌گونه مطالعات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این مطالعه به تعیین ویژگی‌های آب شناسی نظیر تخلخل، تراوایی و محتوای آب^۳ از روی گزردهی دی الکتریک محیط‌های زیرسطحی با استفاده از روابط تجربی موجود و در شرایط آزمایشگاهی، پرداخته شده است. مطالعات آزمایشگاهی کافمن^۴ و همکاران با استفاده از مشخصه‌های امواج GPR در حفرات زیرسطحی به سال ۲۰۰۶ از مطالعات اخیر در آشکارسازی حفرات زیرسطحی است [Kofman et al., 2006]. در این مطالعه، حفرات با ابعاد مختلف و با استفاده از آنتن‌های با فرکانس مرکزی مختلف آشکارسازی شده‌اند. پدیده بازآوایش^۵ زمانی که ابعاد حفرات زیرسطحی در مقایسه با طول موج فرکانس مرکزی آنتن در هوا قابل توجه باشد، به صورت بارزی در مقاطع GPR مشاهده می‌شود [Kofman et al., 2006]. از محدود مطالعات GPR به همراه مقاومت ویژه می‌توان به مطالعه کومزاورتیز^۶ و همکاران در کاربرد دو روش مقاومت ویژه و GPR در آشکارسازی مواد و ساختارهای آتشفشانی به سال ۲۰۰۷ اشاره کرد [Gómez-Ortiz et al., 2007]. آنها دریافتند که مرز بین ساختارهای آتشفشانی و ساختارهایی نظیر گسل‌ها توسط روش مقاومت ویژه و ساختارهای درون نهشته‌های آتشفشانی توسط روش GPR بهتر آشکارسازی می‌شود.

¹ van Overmeeren

² Knight

³ Water content

⁴ Kofman

⁵ Reverberation

⁶ Gómez-Ortiz

از آنجا که پردازش داده‌های GPR از اهمیت بالایی برخوردار است، مطالعات بسیاری در این زمینه دیده می‌شود. از اولین مطالعات در این زمینه می‌توان به مقاله فیشر^۱ و همکاران به سال ۱۹۹۲ در زمینه مهاجرت داده‌های GPR با استفاده از الگوریتم مهاجرت لرزه‌ای، اشاره کرد [Fisher et al., 1992]. در این مطالعه از مهاجرت معکوس-زمان^۲ برای مهاجرت داده‌های GPR در محیط‌های رودخانه‌ای و همچنین چینه‌شناسی رسوبات استفاده شده است. مقاطع حاصل از پردازش مهاجرت در اینگونه محیط‌ها به ویژه زمانی که شیب بازتاب‌کننده‌ها زیاد باشد و یا ساختارهای زیرسطحی به صورت ناگهانی تغییر کنند و پدیده پراش^۳ برجسته گردد، بسیار مؤثر است و پتانسیل تفسیر غلط را کاهش می‌دهد. البته در شرایطی که بازتاب‌کننده‌ها افقی باشند، پردازش مهاجرت تأثیرات مثبتی نخواهد داشت. همچنین مطالعه سان^۴ و یونگ^۵ در خصوص تشخیص بازتاب‌های ناشی از توده‌های روی سطح زمین در مقاطع GPR به سال ۱۹۹۵ از این دست مطالعات است [Sun & Young, 1995]. از آنجا که امواج GPR به راحتی می‌توانند در هوا منتشر شوند، توده‌های روی سطح زمین نظیر درختان، تخته سنگ‌های بزرگ، خطوط انتقال برق و غیره تأثیرات نامطلوبی بر مقاطع GPR خواهند گذاشت و تا حد امکان باید از آنها پرهیز کرد تا تأثیرات نامطلوب آنها بر روی مقاطع GPR مشاهده نگردد. مطالعه زیاً^۶ و همکاران در خصوص افزایش قدرت تفکیک در سنگ‌های آهکی با استفاده از واپیچش معین^۷ داده‌ها به سال ۲۰۰۳ نیز در زمینه پردازش داده‌ها است [Xia et al., 2003]. در این مطالعه با ثبت شکل دقیق پالس GPR و با استفاده از این نوع واپیچش، قدرت تفکیک به شکل قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. محیط‌های آهکی به دلیل اینکه امواج GPR بدون استهلاک و میرایی قابل توجه می‌توانند در آنها انتشار یابند، استفاده از این نوع واپیچش را ساده و ممکن می‌سازد.

در کشور ما مطالعات معدودی در زمینه استفاده از روش GPR انجام گرفته است. در این مورد می‌توان به آشکارسازی شکستگی‌ها و تاق‌دیس‌های نزدیک سطح در منطقه سراب قنبر در جنوب شهر

¹ Fisher

² Reverse-time

³ Diffraction

⁴ Sun

⁵ Young

⁶ Xia

⁷ Deterministic deconvolution

کرمانشاه به سال ۱۳۸۶ اشاره کرد [اویسی مؤخر، ۱۳۸۶]. همچنین مطالعات GPR در کنار روش مغناطیس سنجی در بررسی آثار باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک سطح به سال ۱۳۸۴ در شهر قصر شیرین [اویسی مؤخر و همکاران، ۱۳۸۴]، آشکارسازی قنات و لوله‌های مدفون با استفاده از روش GPR و روش ژئوالکتریک و مقایسه نتایج به دست آمده از این دو روش [کامکارروحانی و همکاران، ۱۳۸۷] [محمدی ویژه، ۱۳۸۷] از کاربردهای دیگر GPR در کشور ما می‌باشد.

۱-۴- ضرورت انجام تحقیق

برای معرفی بهتر روش GPR و بررسی توانایی‌ها و کارایی این روش، مخصوصاً در کشور ما که مطالعات معدودی در این زمینه انجام شده است، کاربرد بیشتر روش GPR و مقایسه آن با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی ضرورت پیدا می‌کند. برای معرفی و مقایسه این روش با دیگر روش‌های معمول ژئوفیزیکی و نشان دادن مزایا و معایب آن در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی بایستی هدفی مناسب انتخاب گردد. در این پایان‌نامه قصد می‌رود تا روش GPR با روش مغناطیس‌سنجی مقایسه گردد، به همین منظور هدفی که برای این مطالعه انتخاب شده است آشکارسازی لوله‌های فلزی مدفون در عمق کم است. به دلیل تباین خوب فلزات با رسوبات اطراف در هر دو روش GPR و مغناطیس‌سنجی، لوله‌های فلزی مدفون هدفی بسیار مناسب برای آشکارسازی توسط روش‌های مزبور می‌باشند. آگاهی از توانایی و کارا بودن روش GPR در زمینه‌های مختلف برای استفاده بیشتر از این روش در مطالعات و تحقیقات کاربردی، امری مهم و بسیار ضروری محسوب می‌شود.

۱-۵- هدف از انجام مطالعه حاضر

در انجام این پایان‌نامه چند هدف اصلی مورد نظر است، که به ترتیبی که اشاره می‌شود، این اهداف در طی این پایان‌نامه بررسی شده‌اند. یکی از اهداف اصلی این پایان‌نامه کاربرد GPR همراه با پردازش و تفسیر داده‌های آن به عنوان یکی از روش‌های غیرمخرب و با قدرت تفکیک بالا در آشکارسازی اهداف

نزدیک به سطح (لوله‌های مدفون در زیر سطح زمین) می‌باشد. با انجام برداشت‌ها در محیط‌های مختلف و بر روی لوله‌های از جنس متفاوت (فلزی و آزیستی) سعی شده است که موفقیت و یا عدم موفقیت روش GPR در شرایط مختلف مذکور نشان داده شود.

یکی دیگر از اهداف اصلی این پایان‌نامه، بررسی مزایا و معایب روش GPR در مقایسه با روش مغناطیس‌سنجی است. در این تحقیق سعی شده است در عمل این دو روش از لحاظ قدرت تفکیک، سرعت برداشت داده‌ها و مقدار اطلاعات به دست آمده با یکدیگر مقایسه شوند. در نهایت پس از بررسی قابلیت‌ها و مزایای روش GPR در مقایسه با دیگر روش‌های ژئوفیزیکی، شرایط مناسب و مطلوب برای کاربرد این روش به عنوان روشی ویژه با قدرت تفکیک بالا در برداشت‌های نزدیک سطح بیان می‌شود.

از دیگر اهداف پایان نامه حاضر می‌توان به نشان دادن قابلیت روش GPR (و همچنین مغناطیس‌سنجی) در محیط‌های شهری اشاره کرد. محیط‌هایی که کاربرد اغلب روش‌های ژئوفیزیک به دلیل محدودیت‌های مکانی و نوفه^۱های محیطی در آنها با مشکلاتی همراه و بعضاً غیر ممکن است. کاربرد، قابلیت و مقایسه روش‌های GPR و مغناطیس‌سنجی در آشکارسازی لوله‌های فلزی مدفون (برای انتقال گاز) و سایر تأسیسات زیرسطحی در محیط‌های شهری داخل شهر و اطراف شهر شاهرود به عنوان اهداف مسئله در این پایان‌نامه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه از شش فصل تشکیل یافته است. در فصل اول که با عنوان مقدمه و کلیات معرفی شده است، مختصری در مورد کاربردها و مروری بر مطالعات انجام شده در زمینه GPR و همچنین ضرورت

^۱ Noise

و هدف انجام این مطالعه مطرح شده است. در فصل دوم با معرفی روش GPR، به بررسی تئوری انتشار و سرعت امواج و نیز ویژگی‌های الکترومغناطیسی مواد، نحوه برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های GPR پرداخته شده است. در فصل سوم، تئوری یا اصول روش مغناطیس‌سنجی و نحوه برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل چهارم نتایج عملیات صحرایی در دو ناحیه در اطراف شهر شاهرود (قلعه شوکت و جاده ابرسج) بررسی شده است. در این فصل مقاطع دوبعدی داده‌های GPR با اعمال پردازش‌های مختلف و تفسیر آنها آورده شده و با نتایج حاصل از برداشت مغناطیس‌سنجی در دو ناحیه مذکور مقایسه گردیده است. در فصل پنجم داده‌های شبکه برداشت در داخل دانشگاه صنعتی شاهرود، به صورت مقاطع دوبعدی و سه‌بعدی با اعمال پردازش‌های مختلف نمایش داده شده‌اند. همچنین نتایج به دست آمده در هر دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی تفسیر شده است. در این فصل با نمایش مقاطع مختلف برداشت روی اهداف متفاوت از نظر جنس و عمق، قابلیت روش GPR در به نقشه درآوردن این‌گونه ساختارها مورد تأکید قرار گرفته است.

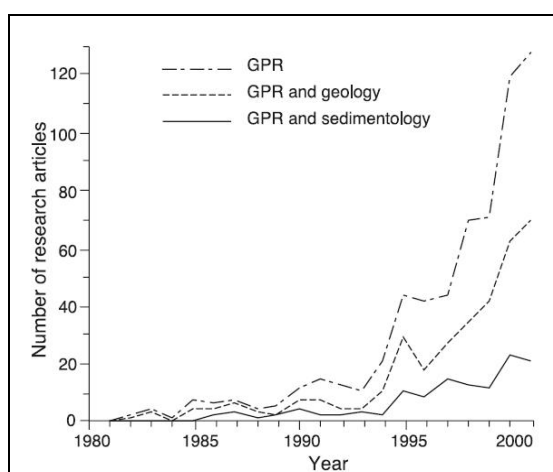
در فصل ششم که فصل انتهایی این پایان‌نامه است، ضمن ارائه یک جمع‌بندی، نتایج حاصل از این مطالعه به همراه پیشنهاداتی برای مطالعات آتی به صورت فهرست‌وار آورده شده است.

فصل دوم

تئوری روش GPR

۲-۱- مروری بر تاریخچه GPR

رادار نفوذی به زمین (GPR) یکی از روش‌های ژئوفیزیک نزدیک سطح است، که ناپیوستگی‌های زیر سطحی را در اعماق کم آشکارسازی می‌کند. اصول و مبانی تئوری این روش شباهت‌های بسیاری با لرزه‌نگاری انعکاسی دارد. موج به کار گرفته شده در روش لرزه‌نگاری مکانیکی و از نوع امواج صوتی است ولی در GPR از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا استفاده می‌شود. در سال ۱۹۰۴ برای اولین بار هولسمیر محقق آلمانی ایده استفاده از امواج الکترومغناطیس فرکانس بالا جهت بررسی‌های زیر سطحی را ایجاد کرد [Parasnis, 1997]. استفاده از این ابزار از سال ۱۹۵۶ آغاز شد و از سال ۱۹۷۰ به بعد توسعه یافت. دستگاه‌های GPR از دهه ۱۹۸۰ به صورت تجاری در دسترس بوده و همان‌طور که در شکل ۲-۱ دیده می‌شود به کارگیری آنها از اواسط دهه ۱۹۹۰ به شدت افزایش یافته است. گستره وسیع کاربردهای این روش به علاوه قدرت تفکیک بالای آن، سرعت در برداشت داده‌ها و همچنین غیر مخرب بودن آن را می‌توان از دلایل توسعه آن در این سالها نام برد. البته نباید شباهت آن با لرزه‌نگاری بازتابی یا انعکاسی و استفاده از روش‌های پردازش و تفسیر داده‌های لرزه‌ای را در این میان فراموش کرد [محمدي ويژه، ۱۳۸۷]. از آنجا که شباهت‌های زیادی بین این دو روش وجود دارد، پاره‌ای از روش‌های پردازش داده‌های لرزه‌ای، مستقیماً بر روی داده‌های GPR قابل استفاده هستند.



شکل ۲-۱: تعداد مقاله‌های تحقیقاتی GPR طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۱ [Neal, 2004]

روش GPR با نامهای دیگری نیز خوانده می‌شود، که در این میان می‌توان به Georadar، Subsurface Penetration Radar، Soil Radar، Ground Penetrating Radar یا GPR، ElectroMagnetic Reflection یا EMR و Subsurface Interface Radar یا SIR اشاره کرد. GPR بعد از سال ۱۹۶۰ با اصطلاح Radio Echo Sounding یا به طور خلاصه (RES) برای اندازه‌گیری لایه های یخ در صفحات یخ قطبی مورد استفاده قرار گرفت. این روش اولین بار توسط استرن^۱ (۱۹۲۹ و ۱۹۳۰) در اتریش برای تخمین ضخامت یخچال‌ها به کار گرفته شد.

۲-۲- تئوری روش GPR

۲-۲-۱- اجزاء دستگاه و خواص موج الکترومغناطیس

همان‌طور که در شکل ۲-۲ دیده می‌شود دستگاه GPR دارای یک مولد سیگنال، یک فرستنده و یک گیرنده می‌باشد. امواج الکترومغناطیسی توسط فرستنده به داخل زمین فرستاده می‌شوند. بخشی از انرژی امواج در برخورد با فصل مشترک‌های زیرسطحی منعکس و یا پخش و بخشی از انرژی در لایه‌ها و یا اشیاء مدفون نفوذ می‌کند. مؤلفه الکتریکی امواج الکترومغناطیس (E) به عنوان یک تابع پیمایش زمانی توسط گیرنده ثبت می‌شود. گیرنده ممکن است توانایی ذخیره و رقمی کردن^۲ داده‌ها، را داشته باشد. بعضی سیستم‌های پیشرفته به همراه یک رایانه بوده که پردازش داده‌ها به هنگام برداشت و بعد از آن را ممکن می‌سازند.

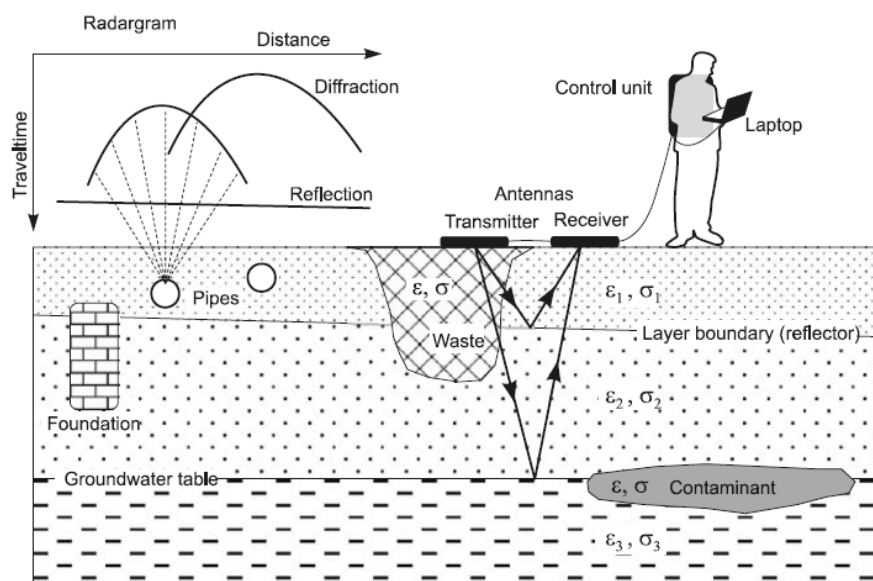
انعکاس (بازتاب) و انکسار امواج الکترومغناطیسی در فصل مشترک‌های بین لایه‌ها و اهداف، که تباینی در خواص الکتریکی دارند صورت می‌گیرد. گذردهی دی‌الکتریکی^۳ (ϵ) و رسانندگی الکتریکی^۴ (σ) پارامترهای فیزیکی تعیین کننده در انعکاس‌پذیری امواج از فصل مشترک‌ها می‌باشند.

¹ Stern

² Digitization

³ Dielectric permittivity

⁴ Electric conductivity



شکل ۲-۲: معرفی اجزاء دستگاه GPR [Knodel K, et al, 2007]

از آنجا که نفوذپذیری مغناطیسی^۱ (μ) برای بیشتر سنگ‌ها به جز سنگ‌های فرومغناطیس برابر با نفوذپذیری خلأ (μ_0) که برابر با $4\pi \times 10^{-7} \left[\frac{Vs}{Am} \right]$ است می‌باشند. در محاسبات از μ_0 به جای μ استفاده می‌شود. برای ارسال و دریافت امواج GPR آنتن‌های باند گسترده^۲ مورد استفاده قرار می‌گیرند. به این ترتیب که برای تحقیقات زمین‌شناسی و مهندسی فرکانس‌های بین ۱۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز و در سایر بررسی‌ها فرکانس‌های بالاتر از ۱۰۰۰ مگاهرتز نیز استفاده می‌شود [Knodel K, et al, 2007].

۲-۲-۲- انتشار، سرعت و جذب امواج GPR

انتشار امواج الکترومغناطیس در سنگ مشابه انتشار امواج لرزه‌ای می‌باشد. با وجود این چندین اختلاف اساسی بین آنها وجود دارد. توجه به این نکات در انجام عملیات صحرایی و پردازش داده‌ها،

^۱ Magnetic permeability

^۲ Band pass

بسیار با اهمیت است. انتشار امواج الکترومغناطیس وابستگی زیادتری نسبت به امواج صوتی به فرکانس موج ارسالی دارد. این وابستگی به فرکانس سبب تغییر در شکل پالس ارسالی در عبور، انعکاس و انکسار از فصل مشترک‌های مختلف می‌شود. مولفه میدان الکتریکی یک موج تخت، که در جهت عمقی Z منتشر می‌شود، به صورت زیر تعریف می‌شود [Hippel, 1954]:

$$E(t, z) = E_0 e^{(i\omega t - \gamma z)} [Vm^{-1}] \quad (1-2)$$

که در رابطه بالا، میدان الکتریکی E، فرکانس زاویه‌ای $\omega = 2\pi f$ [s⁻¹] و ثابت انتشار

$$\gamma = \alpha + i\beta [m^{-1}] \quad (2-2)$$

می‌باشد که در آن α ضریب جذب (میرایی)، β ثابت فاز و $i = \sqrt{-1}$ است.

مولفه میدان مغناطیسی امواج الکترومغناطیس عمود بر مؤلفه میدان الکتریکی بوده و مانند مؤلفه میدان الکتریکی عمود بر جهت انتشار می‌باشد. برای توصیف نحوه انتشار امواج GPR پارامترهای زیر مورد نیاز هستند [Knodel K, et al, 2007].

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (3-2)$$

$$\varepsilon_r^* = \frac{\varepsilon^*}{\varepsilon_0} \quad (4-2)$$

$$\mu^* = \mu' - i\mu'' \quad (5-2)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon'} = \frac{1}{\omega \varepsilon' \rho} \quad (6-2)$$

که در روابط بالا ε^* گذردهی دی‌الکتریک مختلط

ε_r^* گذردهی دی‌الکتریک نسبی مختلط (نسبت به هوا)

μ^* نفوذپذیری مختلط

σ رسانندگی محیط

ρ مقاومت ویژه محیط

ε' و μ' قسمت حقیقی به ترتیب گذردهی دی‌الکتریک مختلط و نفوذپذیری مختلط

ϵ'' و μ'' قست موهومی به ترتیب گذردهی دی الکتریک مختلط و نفوذپذیری مختلط

همان طور که از رابطه (۶-۲) دیده می شود، تانژانت اتلاف^۱ مستقیماً با رسانندگی (σ) و به طور معکوس با فرکانس (f) متناسب است. ضریب جذب (میرائی) (α) که جزء حقیقی و ثابت فاز (β) که قسمت موهومی ثابت انتشار در معادله (۲-۲) می باشند، به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$\alpha = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(\sqrt{1 + \tan^2 \delta} - 1)}{2}} \quad [m^{-1}] \quad (۷-۲)$$

$$\beta = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{\frac{\epsilon_r'(\sqrt{1 - \tan^2 \delta} + 1)}{2}} \quad [m^{-1}] \quad (۸-۲)$$

سرعت نور در خلاء برابر $c_0 = 2.998 \times 10^8 \quad [ms^{-1}]$ می باشد. در مطالعات GPR معمولاً از ضریب جذب $\alpha' = 8.686\alpha \quad [dbm^{-1}]$ به جای α استفاده می شود. سرعت انتشار یا سرعت فاز (v) امواج GPR از رابطه زیر تعیین می شود :

$$v = \frac{\omega}{\beta} = \lambda f \quad [ms^{-1}] \quad (۹-۲)$$

با جاگذاری رابطه $\omega = 2\pi f \quad [s^{-1}]$ طول موج توسط رابطه $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad [m]$ محاسبه می شود.

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه بعدی به سمت پایین حرکت می کند.

سرعت موج الکترومغناطیس انتشار یافته در داخل زمین از رابطه زیر به دست می آید:

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r' \mu_r' \frac{1 + \sqrt{1 + (\frac{\sigma}{\epsilon_r' \omega})^2}}{2}}} \quad (۱۰-۲)$$

در رابطه بالا C_0 سرعت موج الکترومغناطیس در خلاء، μ_r' قسمت حقیقی نفوذپذیری نسبی و ϵ_r' قسمت حقیقی ضریب دی الکتریک محیط نسبت به هوا و ω فرکانس زاویه ای موج GPR می باشند. در محیط های کم اتلاف عبارت $(\frac{\sigma}{\epsilon_r' \omega})$ نزدیک به صفر است، همچنین اگر μ_r' در محیط های غیر

^۱ Loss tangent

مغناطیس کوچک بوده و می‌توان آن را برابر یک در نظر گرفت. به این ترتیب داریم

[Parasnis,1997;Reynolds,1997;van Overmeeren,1994].

$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (۱۱-۲)$$

باید در نظر داشت که رابطه اخیر برای مواد با رسانندگی بالا نظیر آب دریا و برخی از انواع رسها و یا مواد مغناطیسی از قبیل مگنتیت و هماتیت درست نمی‌باشد [Annan, 2001].

مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف شامل مقادیر گذردهی نسبی، رسانندگی، سرعت و اتلاف موج در محیط‌های مختلف در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲ : مشخصات الکترومغناطیس مواد مختلف [Knodel K, et al, 2007].

مواد	گذردهی نسبی (ϵ_r)	رسانندگی (میلی زیمنس بر متر) (mS / M)	سرعت (متر بر نانوثانیه) (M / nS)	اتلاف (دسی بل بر متر) (dB / M)
هوا	۱	۰	۰/۲۹۹۸	۰
آب مقطر	۸۰	۰/۰۱	۰/۰۳۳	۲×۱۰^{-۳}
آب شیرین	۸۰	۰/۵	۰/۰۳۳	۰/۱
آب دریا	۸۰	۳×۱۰^{-۳}	۰/۰۱	$۱۰^{-۳}$
ماسه خشک	۳-۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱
ماسه اشباع	۲۰-۳۰	۰/۱-۱	۰/۰۶	۰/۰۳-۰/۳
سنگ آهک	۴-۸	۰/۵-۲	۰/۱۲	۰/۴-۱
شیل	۵-۱۵	۱-۱۰۰	۰/۰۹	۱-۱۰۰
لای ها	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰
رس ها	۵-۴۰	۲-۱۰۰۰	۰/۰۶	۱-۳۰۰
گرانیت	۴-۶	۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱
نمک خشک	۵-۶	۰/۰۱-۱	۰/۱۳	۰/۰۱-۱
یخ	۳-۴	۰/۰۱	۰/۱۶	۰/۰۱

۳-۲-۲- انعکاس، عبور و انکسار در طی انتشار موج

خواص الکترومغناطیسی یک محیط دی‌الکتریک توسط امپدانس مختلط Z^* (ناگذردهی ماهیتی) بیان می‌شود [Knodel K, et al, 2007].

$$Z^* = Z' + iZ'' = \sqrt{\frac{\mu^*}{\varepsilon^*}} \quad (۱۲-۲)$$

امواج الکترومغناطیسی در برخورد با فصل مشترک بین دو محیط به دلیل اختلاف امپدانس دو محیط انعکاس و انکسار می‌یابند. بخشی از انرژی موج بازتاب شده و بخش دیگر از فصل مشترک عبور کرده و در محیط دوم نفوذ می‌کند. ضریب بازتاب و ضریب عبور توسط روابط زیر بیان می‌شوند [Knodel K, et al, 2007].

$$R = \frac{Z_2 \cos \Phi - Z_1 \cos \Psi}{Z_2 \cos \Phi + Z_1 \cos \Psi} \quad (۱۳-۲)$$

$$T = \frac{2Z_2 \cos \Phi}{Z_2 \cos \Phi + Z_1 \cos \Psi} \quad (۱۴-۲)$$

در روابط ۱۳-۲ و ۱۴-۲ Φ زاویه تابش، Ψ زاویه بازتاب و Z_1 و Z_2 امپدانس الکترومغناطیسی مواد در دو طرف فصل مشترک می‌باشند. وقتی که امواج الکترومغناطیسی به صورت عمود بر فصل مشترک بتابند یعنی زاویه تابش عمود باشد ($\Phi = \Psi = 90^\circ$) در این صورت خواهیم داشت:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (۱۵-۲)$$

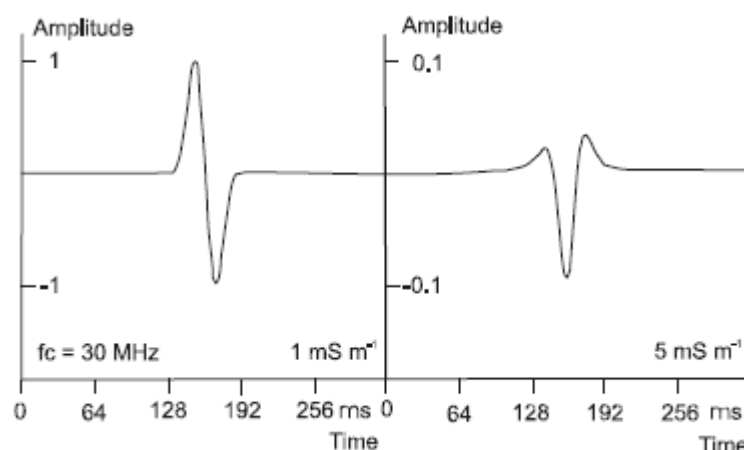
$$T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (۱۶-۲)$$

رابطه ۱۵-۲ در محیط‌های کم اتلاف ($\tan \delta \ll 1$ و $\mu_i^* = \mu_0$) به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon'_{r1}} - \sqrt{\varepsilon'_{r2}}}{\sqrt{\varepsilon'_{r1}} + \sqrt{\varepsilon'_{r2}}} \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1} \quad (۱۷-۲)$$

که در آن، V_1 و V_2 سرعت امواج الکترومغناطیسی در دو طرف فصل مشترک می‌باشد. انعکاس و عبور امواج الکترومغناطیسی در فصل مشترک بین دو محیط با مشخصات الکتریکی متفاوت، باعث تغییر

شکل آنها می‌شود. این مسئله یکی از تفاوت‌های اساسی رفتار امواج صوتی و امواج الکترومغناطیس در برخورد با فصل مشترکها است [Knodel K, et al, 2007].



شکل ۲-۳: شکل موجک قبل از (سمت چپ) و بعد از (سمت راست) بازتاب عمودی از فصل مشترک بین دو محیط با تغییر رسانندگی از ۱ تا ۵ میلی‌زیمنس بر متر [Knodel K, et al, 2007].

امواج الکترومغناطیس در محیط‌های پیچیده از نظر زمین‌شناسی (لایه‌های نازک، چندلایه‌ها و ...) همانند امواج لرزه‌ای عمل می‌کند. اما انعکاس‌های چندگانه^۱ در این مناطق برای GPR اهمیت زیادی ندارد. زیرا امواج GPR دستخوش اتلاف قابل توجهی می‌شوند و تنها حدود ده درصد از انرژی ارسال شده منعکس می‌شود.

۲-۲-۴- قدرت تفکیک

به طور کل توانایی تفکیک سیگنال‌ها از اهداف نزدیک به هم را در ژئوفیزیک قدرت تفکیک گویند. در GPR تفکیک‌پذیری به فرکانس مرکزی و پهنای باند و همچنین پارامترهای الکتریکی از قبیل رسانندگی و ضریب دی‌الکتریک و نیز شکل هندسی هدف وابسته است.

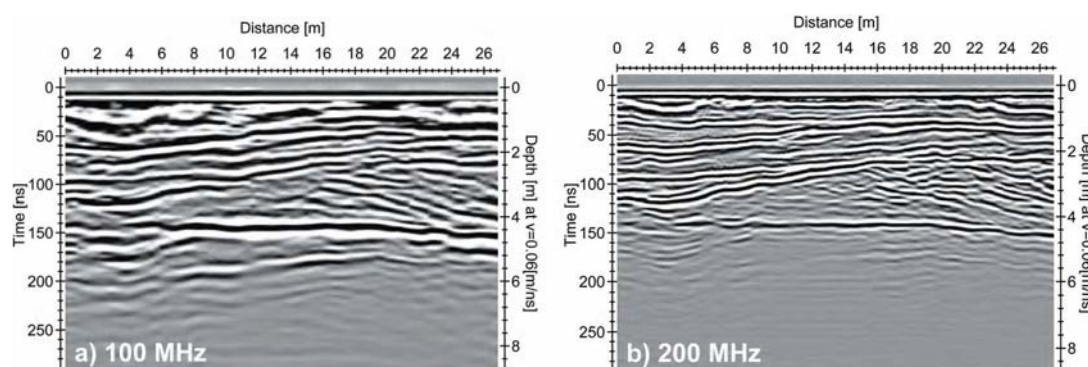
^۱ Multiple reflections

به عنوان یک قانون کلی تفکیک پذیری عمودی از نظر علمی برابر است با یک چهارم طول موج (طول موج: $\lambda = \frac{V}{f}$). در اینجا V سرعت موج الکترومغناطیس و f فرکانس مرکزی می باشند. ولی به طور

عملی و برای پرهیز از اشتباهات این مقدار را بزرگتر در نظر می گیرند.

برای مثال، با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز طول موج برای یک محیط آهکی با سرعت ۰/۱۲ متر بر ثانیه برابر $\lambda = 1.2m$ است. از این رو تفکیک پذیری در این مورد ۰/۳ متر خواهد بود و با استفاده از این آنتن فصل مشترک های در فاصله ۳۰ سانتیمتری را می توان تفکیک کرد. از آنجا که طول موج تابعی از سرعت امواج در محیط است، قدرت تفکیک GPR در سنگ های مرطوب بیشتر از سنگ خشک می باشد. این مطلب از سرعت فوق العاده پایین امواج در آب ناشی می شود [Knodel K, et al, 2007].

در شکل ۲-۴ پروفیل های GPR را که با استفاده از دو آنتن ۱۰۰ و ۲۰۰ مگاهرتز برداشت شده اند، نشان می دهد. همان طور که در این شکل دیده می شود، تفکیک پذیری عمودی با فرکانس مرکزی آنتن ها رابطه مستقیم دارد و با افزایش فرکانس مرکزی آنتن، تفکیک پذیری عمودی افزایش یافته است.



شکل ۲-۴: مقاطع زمانی GPR با استفاده از آنتن های ۱۰۰ مگاهرتز (a) و ۲۰۰ مگاهرتز (b) در یک منطقه

[Moller I., 2006]

تفکیک‌پذیری افقی، بیشتر از آنکه تحت تأثیر طول موج باشد، به گسترش موج الکترومغناطیس وابسته است. هرچه عمق قرار گیری هدف بیشتر باشد، تمرکز امواج GPR کاهش می‌یابد و در نتیجه تفکیک‌پذیری افقی کاهش می‌یابد. نیل^۱ (۲۰۰۴) جزئیات تأثیر اختلاف نمونه‌ها در ارزیابی تفکیک‌پذیری افقی را مطرح کرده است [Neal, 2004].

۲-۵- عمق نفوذ

عمق نفوذ توسط فرکانس مرکزی GPR، ضریب اتلاف ساختارهای زیرسطحی که تابعی از رسانندگی الکتریکی این ساختارها است، کنترل می‌شود [Moller I., 2006]. در نهشته‌های کم اتلاف، آنتن‌های با فرکانس مرکزی پایین تا عمق نسبتاً زیاد و آنتن‌های با فرکانس مرکزی بالاتر تا اعماق کمتری نفوذ می‌کنند. این امر بیانگر وجود رابطه عکس بین عمق نفوذ و فرکانس مرکزی امواج GPR است. در این رابطه گزارشات حاصل از تحقیقات رسوب‌شناسی نشان می‌دهد که عمق نفوذ برای فرکانس ۴۰ تا ۵۰ مگاهرتز ۳۰ تا ۴۰ متر، فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز ۱۰ تا ۲۵ متر، فرکانس ۲۰۰ مگاهرتز ۵ تا ۱۵ متر و برای فرکانس ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ مگاهرتز فقط چند متر است. در تحقیقات به عمل آمده، بیشترین عمق نفوذ به‌دست آمده توسط امواج GPR در سنگ‌های خشک و شن و ماسه‌های خشک و خالص بوده است [Smith and Jol, 1995; Bakker, 2004; Jol and Bristow, 2003].

همانطور که ذکر شد، انتشار امواج در داخل زمین باعث اتلاف انرژی آنها می‌شود. میزان سرعت ضعیف شدن سیگنال GPR بطور ساده، به رسانندگی الکتریکی زمین وابسته است. در موادی که دارای مقاومت الکتریکی بالایی (مواد مقاوم) هستند، قدرت سیگنال امواج با سرعت پایین‌تری ضعیف می‌شود. در حالی که در مواد با رسانندگی بالا مانند خاک رس یا رسوباتی که منافذ آنها از محلول آب شور پر شده است، اتلاف خیلی سریع صورت می‌گیرد و عمق نفوذ بطور قابل توجهی کاهش می‌یابد.

^۱ Neal

برای مثال، با استفاده از یک آنتن GPR ۱۰۰ مگاهرتزی در رسوبات رسی، عمق نفوذ تنها چند متر و در رسوباتی که منافذ آنها با آب شور پر شده است، عمق نفوذ به چند سانتیمتر کاهش می‌یابد.

۲-۳- شیوه برداشت داده‌های GPR

از آنجا که برداشت داده‌های GPR در این پایان‌نامه توسط دستگاه Noggin Plus شرکت کانادایی Sensor & Software انجام شده [Sensors and Ssoftware, 1999] در اینجا مختصری به توضیح شیوه برداشت داده‌ها در این دستگاه می‌پردازیم.

این دستگاه دارای یک صفحه نمایش دیجیتالی (DVL)^۱ است که توسط کابل‌های فلزی به آنتن‌ها و باتری دستگاه متصل می‌شود. با استفاده از این نمایشگر تنظیماتی از قبیل انتخاب پارامترهای برداشت و نحوه برداشت داده‌ها توسط کاربر، امکان‌پذیر است. همچنین داده‌های برداشت شده را در حین عملیات صحرایی و بعد از انجام عملیات صحرایی می‌توان از طریق این صفحه نمایش مشاهده کرد. برداشت داده‌ها توسط این دستگاه به دو صورت خطی^۲ و شبکه‌ای^۳ انجام می‌گیرد. نحوه برداشت داده‌ها با انتخاب گزینه مورد نظر در صفحه نمایش می‌تواند توسط یکی از شیوه‌های مذکور، صورت پذیرد.

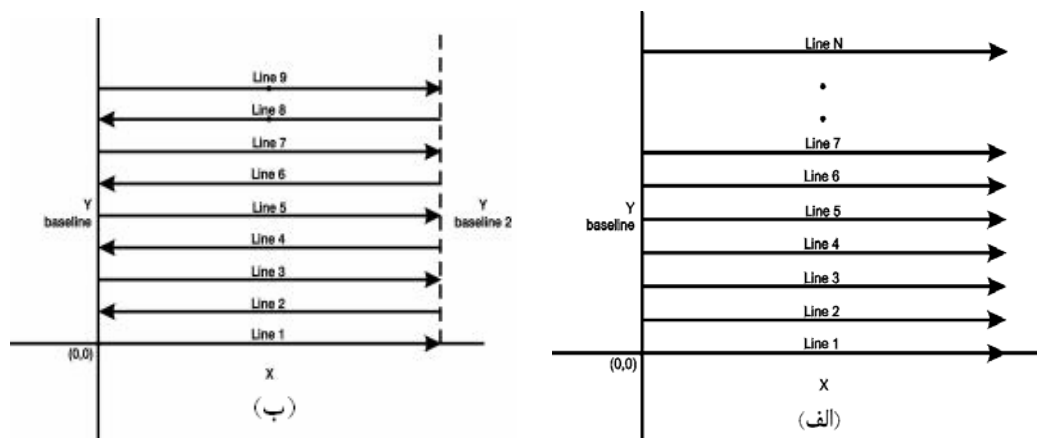
۲-۳-۱- برداشت خطی

در این روش چند پروفیل موازی با هم در ناحیه برداشت مورد نظر در نظر گرفته می‌شود و برداشت داده‌ها همان‌طور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، در طول این پروفیل‌ها بصورت مستقیم و یا رفت و برگشت انجام می‌گیرد.

^۱ Digital Video Logger

^۲ Linear

^۳ Gridding



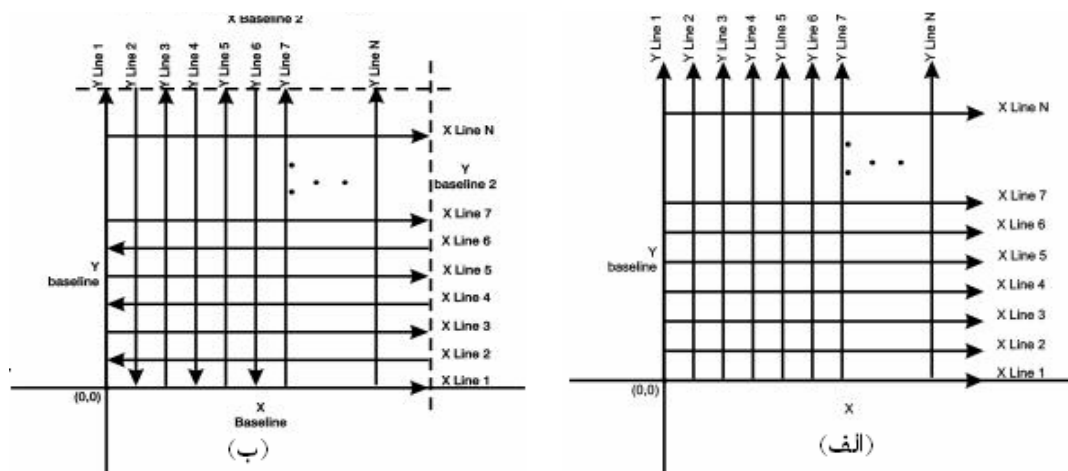
شکل ۲-۵: برداشت خطی مستقیم (الف)، برداشت خطی رفت و برگشت (ب) [Sensors and Software, 1999]

۲-۳-۲- روش شبکه‌بندی

در این روش پس از انتخاب گزینه Grid روی صفحه نمایش، یک شبکه از پروفیل‌های عمود بر هم به صورت X و Y در نظر می‌گیریم، به طوری که فاصله بین پروفیل‌های موازی در جهت Y و فاصله بین پروفیل‌های موازی در جهت X یکسان باشد. برداشت داده‌ها در امتداد پروفیل‌های شبکه به صورت مستقیم^۱ یا رفت و برگشت^۲ برای بالا بردن سرعت برداشت صورت می‌گیرد. لازم به توضیح است که با استفاده از برداشت‌های خطی و شبکه‌ای نمایش داده‌های GPR با استفاده از نرم‌افزارهای موجود، به صورت سه‌بعدی امکان‌پذیر است. داده‌های مورد نیاز در این تحقیق، با هر دو روش مذکور، برداشت شده‌اند.

^۱ Forward

^۲ Reverse



شکل ۲-۶: برداشت شبکه‌ای مستقیم (الف)، برداشت شبکه‌ای رفت و برگشت (ب) [Sensors and Software, 1999]

۲-۴- پردازش داده‌های GPR

۲-۴-۱- روال پردازش داده‌های GPR

به‌طور کلی پردازش داده‌های ژئوفیزیک به منظور غلبه بر محدودیت‌های ذاتی و نوفه‌های موجود در داده‌های خام، صورت می‌پذیرد. روش GPR نیز از این قاعده مستثنی نیست و حتی در پاره‌ای از مطالعات بدون اعمال پردازش‌های مناسب، دستیابی به هدف مورد نظر غیر ممکن به نظر می‌رسد. دامنه پردازش‌های به کار رفته بر روی داده‌ها توسط پارامترهای مختلفی کنترل می‌شود. در برخی از مطالعات ممکن است حتی از اعمال پردازش‌های ابتدایی بر روی داده‌ها خودداری شود و در پاره‌ای از آنها دامنه وسیعی از پردازش‌ها بر روی داده‌ها صورت پذیرد. همچنین استاندارد خاصی برای روال پردازش داده‌های GPR موجود نیست، ولی می‌توان روال پردازش زیر را به‌عنوان یکی از معمول‌ترین آنها ذکر کرد. که به ترتیب عبارتند از :

- ۱- اولین مرحله، ویرایش داده‌ها است. این مرحله برای تصحیح خطاهای ناشی از برداشت داده‌ها از قبیل معکوس کردن جهت پروفیل‌ها، پیوند فایل‌ها، حذف ردهای تکراری و اضافه کردن آنها در

ایستگاههایی که برداشت صورت گرفته، ویرایش پارامترهای برداشت از قبیل فرکانس مرکزی، فاصله آنتن‌ها و ... صورت می‌پذیرد.

۲- بعد از ویرایش داده‌ها، اولین مرحله پردازش، اعمال فیلتر Dewow است. Dewow یک فیلتر بالاگذر است که برای گذراندن پیک طیف سیگنال ارسالی برای فرکانس مرکزی یک آنتن خاص طراحی شده است. این فیلتر جهت حذف فرکانس‌های پایین است که باعث اشباع سیگنال در گیرنده شده‌اند.

۳- تصحیح صفر زمانی^۱ ممکن است مرحله بعدی باشد. جابه‌جایی صفر زمانی می‌تواند به دلیل اختلاف دما بین وسایل الکتریکی و دمای هوا یا اتصالات کابل‌ها ایجاد شود. جابه‌جایی صفر زمانی بر روی تمام ردها در طول پروفیل صورت می‌پذیرد.

۴- اگر در پروفیل‌های GPR نوفه الکترومغناطیس فرکانس بالا وجود داشته باشد، می‌توان با اعمال فیلترهای پایین‌گذر^۲ یا میان‌گذر^۳ این نوفه‌ها را کاهش داد.

۵- یک فیلتر پایین‌گذر سه‌بعدی، انعکاس‌های با شیب کم را کاهش می‌دهد. همچنین ساختارهای شبیه هذلولی‌های پراش و بازتاب با شیب تند را سریعاً حذف می‌کند. یک فیلتر بالاگذر سه‌بعدی در جهت عکس عمل می‌کند. این فیلتر هذلولی‌های پراش و انعکاس‌های شبیدار را تقویت کرده و انعکاس‌های تخت را ضعیف می‌کند. از آنجا که این فیلترها، شکل مقاطع را به کلی تغییر می‌دهند در استفاده از آنها باید دقت کرد.

۶- پردازش مهاجرت در خیلی از موارد به نمایش دقیق انعکاس‌های مهم کمک می‌کند. با اعمال این پردازش بازتاب‌ها به موقعیت صحیح‌شان برگردانده می‌شوند. قبل از به‌کارگیری روش مهاجرت، سرعت امواج الکترومغناطیس در ساختارهای زیرسطحی، بایستی تعیین شود. در اعمال پردازش مهاجرت، معمولاً از روش مهاجرت با سرعت ثابت استفاده می‌شود.

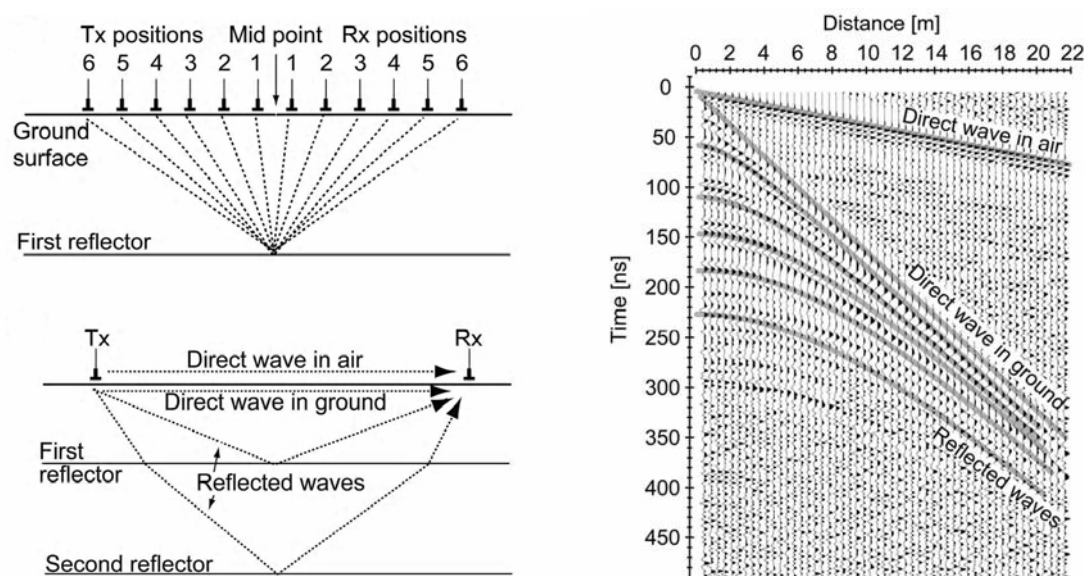
^۱ Zero time

^۲ Low pass

^۳ Band pass

۷- به واسطه اتلاف و پخش هندسی امواج الکترومغناطیس، بازتاب‌های در اعماق بیشتر، بسیار ضعیف‌تر هستند. برای تقویت این بازتاب‌ها از بهره‌ها استفاده می‌شود. چندین روش برای اعمال بهره‌ها وجود دارد. که در این میان می‌توان به کنترل بهره اتوماتیک (AGC)^۱ انتشار و جبران نمائی (SEC)^۲، بهره ثابت و ... اشاره کرد.

۸- یکی از آخرین مراحل پردازش، تبدیل مقاطع زمانی به عمقی و تصحیح توپوگرافی است. قبل از این مرحله باید سرعت امواج الکترومغناطیس در منطقه معلوم باشد. معمول‌ترین روش برای تعیین سرعت، سونداژنی به روش نقطه میانی مشترک (CMP)^۳ است. همچنین در برخی از دستگاه‌ها و نرم‌افزارهای GPR، امکان تعیین سرعت با استفاده از برازش هذلولی‌های ناشی از اهداف خطی (نظیر لوله‌ها) امکان‌پذیر است [Moller I., 2006].



شکل ۲-۷: نحوه برداشت داده‌ها به روش CMP (سمت چپ) و مقطع حاصل از برداشت CMP (سمت راست) بدست

آمده [Moller I., 2006]

^۱ Automatic gain control

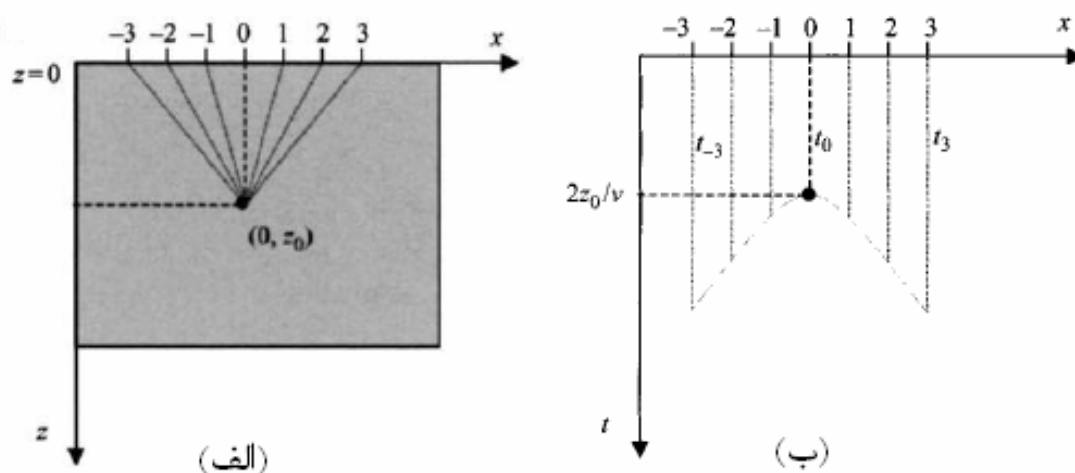
^۲ Spreading and Exponential Compensation

^۳ Common Mid Point

۲-۴-۲- اساس کار تکنیک مهاجرت در واپیچش (دیکانولوشن)^۱

بازتاب‌های اهداف نقطه‌ای در زیر سطح به علت ارسال سه‌بعدی امواج توسط آنتن‌ها به صورت هذلولی دیده می‌شوند. با استفاده از نمایش هندسی مسیر موج، همان‌طور که در شکل ۲-۹ مشاهده می‌شود، این امر می‌تواند به آسانی بررسی شود. فرض کنید در یک نیم‌فضای همگن با سرعت انتشار V و یک هدف نقطه‌ای در موقعیت $(0, Z_0)$ قرار گرفته باشد. اگر از یک آنتن برای ارسال و دریافت امواج استفاده شود، با حرکت این آنتن در ایستگاه‌های مختلف $(x, 0)$ موقعیت هدف نسبت به آنتن برابر است با $\sqrt{x^2 + Z_0^2}$ پس فاصله زمانی متناسب با این فاصله مطابق با شکل ۲-۸ به صورت زیر محاسبه خواهد شد.

$$t = \frac{2}{V} \sqrt{x^2 + Z_0^2} \quad (2-18)$$



شکل ۲-۸: نقطه پراکنده‌ساز در موقعیت $(0, Z_0)$ (الف)، داده‌های ثبت شده $b(x, t)$ (ب) [David J. Daniels, 2004].

^۱ Deconvolution

معادله (۲-۱۸) معادله یک هذلولی با یک محور عمودی و یک قله در $(0, \frac{2z_0}{V})$ می‌باشد. شکل این هذلولی به چند فاکتور از قبیل، آرایش آنتن‌ها (تک‌آنتن^۱ یا دوآنتن^۲)، عمق نقطه پراکنده‌ساز (z_0) و سرعت انتشار بستگی دارد. با پردازش داده‌ها، این هذلولی به نقطه $(0, \frac{2z_0}{V})$ که پراش از آن صورت گرفته است، تمرکز می‌یابد. این نوع پردازش، مهاجرت یا (SAR)^۳ نامیده می‌شود. در حال حاضر الگوریتم‌های مختلفی برای مهاجرت داده‌های لرزه‌ای ارائه شده است که بیشتر آنها مستقیماً قابل استفاده از داده‌های GPR می‌باشند.

به طور کلی منظور از تکنیک‌های مهاجرت بازگرداندن بازتاب‌ها به موقعیت و شکل حقیقی‌شان است. بنابر این، مهاجرت یک واپیچش سه‌بعدی است، که تفکیک‌پذیری سه‌بعدی را افزایش می‌دهد. هدف بیشتر روش‌های مهاجرت، کاهش تأثیر زمین بر روی امواج انتشار یافته و کاهش اتلاف و پراکندگی ناشی از انتشار امواج در زمین می‌باشد.

۲-۴-۳- مهاجرت^۴

تکنیک مهاجرت در لرزه‌نگاری و ژئوفیزیک مهندسی به صورت دوبعدی توسط هاگدورن^۵ [Hagedoorn, 1954] توسعه یافت. با معلوم بودن سرعت در مواد در موارد دوبعدی تصویر هندسی نسبتاً درستی از ساختارهای زیرسطحی به‌دست می‌آید.

^۱ Monostatic

^۲ Bistatic

^۳ Synthetic Aperture Radar

^۴ Migration

^۵ Hagedoorn

اگر زمان ثبت شده برای نقطه بازتاب‌کننده t باشد، آنگاه عمق بازتاب‌کننده (Z) از طریق رابطه

$$Z = \frac{Vt}{2}$$

دست می‌آید:

$$Z_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + z_0^2} \quad (19-2)$$

در این رابطه Z_0 عمق هدف و X_0 فاصله آنتن تا موقعیت قرارگیری هدف بر روی سطح در زمان t_0 است.

برکات^۱ [Berkhout, 1981] نشان داد، که تکنیک‌های برون‌یابی میدان موج مبنی بر سه روش است :

۱- روش مجموعه کریشهوف^۲ ۲- روش موج صفحه‌ای^۳ (روش F-K) ۳- روش تفاوت‌های محدود^۴

هرچند روش‌های شرح داده شده توسط برکات^۵ با تئوری انتشار صوتی به دست آمده‌اند، اما این هم مبتنی بر خواص و کمیت‌های تابع موج است و از سونداژهای الکترومغناطیس مشتق شده و وابسته به سطح داده‌های رادار نفوذی هستند.

یک دستورالعمل، به عنوان مهاجرت حوزه فرکانس عدد موج توسط تریتل و رایبسن [Annan, 2001] با استفاده از روش تبدیل فوریه برای ارزیابی سطح بازتاب‌کننده ارائه شده است.

روش فرکانس عدد موج توسط استولت توسعه یافت و آنوقت توسط هوگان^۶ [Hogan, 1988] برای مهاجرت داده‌های GPR استفاده شد. فیشر^۷ و مچان^۸ [Fisher & Mechan, 1992] توضیح دادند که بکارگیری این روش به طور مؤثر در محیط‌های با سرعت انتشار مختلف بسیار مشکل است. فیشر روش پراش کریشهوف و مهاجرت معکوس زمان را با هم مقایسه کرد. نتایج مهمی از این مقایسه به دست آمد. وقتی سرعت‌هایی که برای مهاجرت انتخاب می‌شوند پایین‌تر از سرعت واقعی هستند،

¹ Berkhout

² Kirchhoff Summation approach

³ Plane wave method

⁴ Finite difference method

⁵ Berkhout

⁶ Hogan

⁷ Fisher

⁸ Mc Mechan

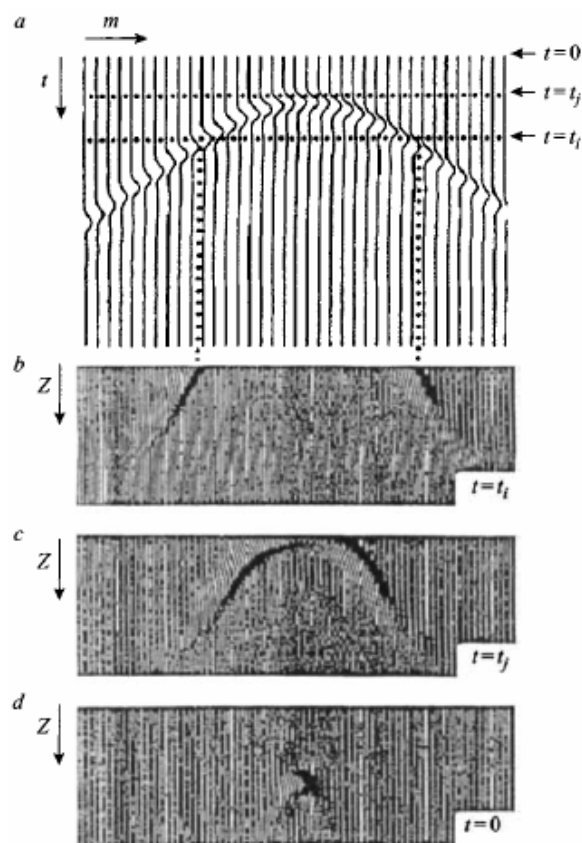
پراش یا دنباله‌ها پایین‌تر از موقعیت بازتابنده خود را نشان می‌دهند و وقتی سرعت مهاجرت خیلی بالاتر از سرعت واقعی انتخاب شود، دنباله‌ها به بالاتر از موقعیت واقعی بازتابنده امتداد می‌یابد. معادله عدد موج به دست آمده توسط میشل^۱ [Mitchell, 1969] به صورت معادله (۲-۲۲) ارائه می‌شود.

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{1}{V(x,z)} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \quad (2-20)$$

که در آن U میدان اسکالر موج و $V(x,z)$ سرعت انتشار محلی است. معادله موج از طریق روش تفاوت‌های محدود مرکزی درجه دوم حل می‌شود. این روش توسط کلیربوت^۲ [Claerbout, 1985] و مچان [Mechan, 1983] توسعه یافت.

همان‌طور که در شکل ۸-۲ مشاهده می‌شود، پردازش مهاجرت معکوس زمان، با پردازش داده‌های برداشت شده از زمان انتهایی به زمان صفر در یک پنجره زمانی، پاسخ‌های هذلولی شکل ناشی از بازتاب کننده‌های نقطه‌ای را به جای اصلی برمی‌گرداند. در این شکل ما شاهد مراحل اجرای پردازش مهاجرت معکوس زمان هستیم. شکل ۸-۲ a نمایش شماتیک تریس‌های ایستگاه‌های برداشت شده، به صورت یک مقطع زمانی می‌باشد. شکل‌های ۸-۲ b، c و d به ترتیب مراحل پردازش عکس زمان را نمایش می‌دهند، به طوری که سه مقطع عمقی نمونه برداری شده در زمان‌های t_i ، t_j و 0 را نشان می‌دهد و همان‌طور که در شکل ۸-۲ a مشخص شده است، $t_i < t_j < 0$ می‌باشد. بنابر این در این شکل شاهد نحوه عمل‌کرد پردازش مهاجرت معکوس زمان بر روی داده‌ها هستیم که نهایتاً به مقطع عمقی شکل ۸-۲ d ختم می‌شود که این شکل بیانگر محل و عمق واقعی بازتاب کننده است.

^۱ Mitchell^۲ Claerbout



شکل ۲-۹: پردازش مهاجرت معکوس زمان [David J. Daniels, 2004]

فصل سوم

مروری بر تئوری روش مغناطیس سنجی

مقدمه :

مطالعه مغناطیس کره زمین قدیمی‌ترین شاخه ژئوفیزیک است. از سه قرن پیش معلوم بوده که زمین به صورت یک مغناطیس بزرگ و تا اندازه‌ای بی‌نظم رفتار می‌کند. سر ویلیام گیلبرت^۱ (۱۶۰۳-۱۵۴۰) اولین بررسی‌های علمی را در مورد مغناطیس زمین انجام داد و در کتابش به نام مغناطیس می‌نویسد که اطلاعات در مورد این خاصیت مانیتیت را مارکوپولو از چین به اروپا آورد.

گیلبرت نشان داد که میدان مغناطیسی زمین هم ارز یک مغناطیس ماندگار است که در راستایی عموماً شمالی-جنوبی در نزدیکی محور چرخش زمین قرار دارد.

برای اولین بار در سال ۱۸۴۳ تغییرات میدان برای تعیین محل کانسارهای مغناطیسی به کار برده شد. در ابتدا اندازه‌گیری‌های میدان مغناطیسی زمین اغلب برای یک مؤلفه (اکثراً مؤلفه قائم) انجام می‌پذیرفت، تا اینکه در طی جنگ جهانی دوم مگنتومتر فلاکس گیت برای آشکارسازی زیر دریایی‌ها با استفاده از هواپیما ابداع شد. بعد از اتمام جنگ، مگنتومتر فلاکس گیت و سیستم‌های رادار و دیگر تجهیزات جنگی امکان انجام برداشت‌های مغناطیس هوایی را ممکن ساخت.

ثبت و پردازش دیجیتالی داده‌ها و کاهش اندازه‌گیری لازم برای تهیه نقشه‌های مغناطیسی سبب کم کردن مشکلات ناشی از استفاده این روش گردیده است. به طور کلی روش‌های مغناطیسی مکمل دیگر روش‌های کاوش ژئوفیزیکی است به طوری که یک برنامه ژئوفیزیکی بدون کاربرد روش مغناطیسی در آن، حداقل در مرحله شناسایی، به سختی قابل تصور است.

¹ Gilbert

۳-۱-۱- ضریب مغناطیس پذیری یا پذیرفتاری مغناطیسی

در روش مغناطیسی سنجی یکی از عوامل مهم، اندازه‌گیری پذیرفتاری مغناطیسی سنگ‌ها است. مغناطیس مشاهده شده در هر سنگ از دو مؤلفه القایی و باقی مانده تشکیل شده است و در واقع پذیرفتاری مغناطیسی با رابطه ساده‌ای به صورت زیر معرفی می‌شود [کریم پور و دیگران ۱۳۸۴].

$$I = K \times H \quad (۳-۱)$$

که در آن I مغناطیس القایی و H شدت میدان مغناطیسی زمین می‌باشد. مغناطیس القایی در جهت میدان زمین بوده و متناسب با شدت میدان است. ثابت K پذیرفتاری مغناطیسی نامیده می‌شود. این عامل بستگی به ترکیب شیمیایی کانی مغناطیسی موجود، درصد حجمی کانی‌های مغناطیسی، شدت میدان القایی، حالت مغناطیسی شدن و اندازه دانه‌ها دارد.

هر چند تغییرات بزرگی برای مقادیر K ، حتی برای یک سنگ به خصوص وجود دارد، هم‌پوشانی وسیعی بین نوع‌های مختلف مشاهده می‌شود. به طور کلی سنگ‌های رسوبی پایین‌ترین و سنگ‌های آذرین بالاترین میانگین خود پذیری را دارا می‌باشد. مقدار خود پذیری سنگ‌ها به مقدار کانی‌های فری مغناطیس (عمدتاً مگنتیت، ایلمنیت و پیروتیت) بستگی دارد. مقدار پذیرفتاری مغناطیسی در برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها در جدول ۳-۱ آمده است.

جدول ۳-۱: پذیرفتاری مغناطیسی برخی از کانی‌ها و سنگ‌های رسوبی [Telford et al., 1990]

کانی	مقدار متوسط پذیرفتاری مغناطیسی (SI) × 10 ³
پیریت	۱/۵
کالکو پیریت	۰/۴
اسفالریت	۰/۷
گرافیت	۰/۱
لیمونیت	۲/۵
هماتیت	۶/۵
مگنتیت	۶۰۰۰
دولومیت	۰/۱
ماسه سنگ	۰/۳
شیل	۰/۶

۳-۱-۲- مغناطیس سنگ‌ها و کانی‌ها

کانی‌ها از نظر داشتن خاصیت مغناطیسی به سه دسته تقسیم می‌شوند:

۱- کانی‌های پارامغناطیس: کانی‌هایی که دارای اتم‌هایی با الکترون فرد بوده و وقتی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، جهت مغناطیسی اتمی آنها موازی با جهت میدان اعمال کننده است در این دسته قرار می‌گیرند. ضریب مغناطیس پذیری یا پذیرفتاری مغناطیسی در این کانی‌ها مثبت است. کانی‌های پارامغناطیس شامل سیلیکات‌های مهم تشکیل دهنده سنگ‌ها مانند الیون، پروکسن، آمفیبول و بیوتیت هستند.

۲- کانی‌های دیامغناطیس: کانی‌های دیامغناطیس آن دسته از کانی‌ها هستند که دارای اتم‌هایی با الکترون زوج می‌باشند و وقتی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی قرار می‌گیرند، جهت میدان مغناطیسی اتمی آنها در جهت مخالف با میدان مغناطیسی اعمال کننده است. پذیرفتاری مغناطیسی در این کانی‌ها منفی است. از کانی‌های دیا مغناطیس می‌توان به کوارتز، کلسیت و نمک اشاره کرد.

۳- کانی‌ها فرومغناطیس: کانی‌های فرومغناطیس به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف: کانی‌های فرومغناطیس واقعی که در آن گشتاورهای اتمی، همگی در یک جهت قرار می‌گیرند. آهن، نیکل و کبالت خالص در این دسته قرار می‌گیرند.

ب: کانی‌های آنتی فرومغناطیس که در آن گشتاورهای اتمی به طور مساوی در جهت مخالف هم قرار می‌گیرند و در واقع از نظر خاصیت مغناطیسی خنثی می‌شوند، مثل هماتیت و لیمونیت.

ج: کانی‌های فری مغناطیس که در آن گشتاورهای حوزه‌های مغناطیسی به صورت نامساوی و در جهت مخالف هم قرار می‌گیرند و در واقع یک جهت دارای خاصیت مغناطیسی قوی‌تری است. از میان کانی‌های فری مغناطیس می‌توان به مگنتیت، ایلمنیت یا پیروتیت اشاره کرد. در اکتشاف مواد معدنی به کمک روش مغناطیس‌سنجی در واقع کانی‌های فری مغناطیس کانسار نقش اساسی دارند [کریم پور و دیگران، ۱۳۸۴].

۳-۱-۳- مغناطیس باقیمانده

مغناطیس باقیمانده، خصوصیتی است که حوزه‌های مغناطیسی کانی مغناطیسی در جهت میدان القایی زمان تشکیل آن کانی در آن محفوظ می‌شود. به علت معکوس شدن جهت میدان مغناطیسی زمین، حرکات تکتونیکی و غیره، مغناطیس باقیمانده لزوماً در جهت میدان زمان حاضر ممکن است، نباشد. این اثر به‌غایت پیچیده مرتبط با تاریخچه مغناطیسی سنگ‌ها بوده و تحت عنوان مغناطیدگی بازماند نرمال در دیرینه شناسی مغناطیسی مورد مطالعه قرار گرفته است [Telford et al., 1990]. اطلاعات به دست آمده از این رشته علمی در ارتباط با مغناطیسی باقیمانده در سنگ‌ها ارزش قابل

ملاحظه‌ای در تفسیر بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دارد. خصوصاً بدین علت که جداسازی مغناطیسی القایی در میدان غیر ممکن است.

۳-۲- پردازش داده‌های مغناطیسی

۳-۲-۱- تفکیک بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقیمانده

نقشه‌های میدان‌های پتانسیل تهیه شده از برداشت‌های مغناطیس‌سنجی، مجموع اثرات توده‌های با نفوذپذیری مغناطیسی متفاوت در اعماق مختلف می‌باشد. به عبارت دیگر نتیجه برداشت به کلیه بی‌هنجاری‌های موجود در منطقه مربوط می‌شود. در نقشه میدان‌های پتانسیل، تأثیرات سنگ بستر با تغییرات خطی و ملایم مشخص می‌شوند. این اثرات خطی، بی‌هنجاری ناحیه‌ای نامیده می‌شود. بی‌هنجاری ناحیه‌ای دارای یک فرکانس فضایی پایین و طول موج بلند می‌باشد در حالی‌که بی‌هنجاری‌های باقیمانده که مربوط به توده‌های زیرسطحی کم عمق می‌شوند دارای فرکانس‌های فضایی بالا و طول موج کوتاه می‌باشند [Reynolds, 1997].

در مطالعات ناحیه‌ای مغناطیس‌سنجی به منظور واضح‌تر شدن بی‌هنجاری‌های حاصله از اشکال بزرگ مقیاس (بی‌هنجاری ناحیه‌ای)، باید بی‌هنجاری‌های باقیمانده (حاصل از منابع زیرسطحی با گسترش جانبی محدود) را از روی بی‌هنجاری‌های مشاهده شده حذف نمود.

در نقشه‌های میدان‌های پتانسیل تأثیرات توده‌های عمیق محدوده وسیعی را در نقشه بی‌هنجاری در بر گرفته و برعکس تأثیرات سطحی منطقه کوچکی را شامل می‌شوند، بنابراین مقادیر بی‌هنجاری باقیمانده طبق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$A_{\text{residual}} = A_p - A_{\text{regional}} \quad (2-3)$$

که در این رابطه A_{residual} بی‌هنجاری باقیمانده، A_p بی‌هنجاری میدان پتانسیل و A_{regional} بی‌هنجاری ناحیه‌ای می‌باشد.

در اغلب کارهای اکتشافی تفسیر و مدل سازی عددی بر روی داده های میدان باقیمانده انجام می شود و اعتبار تفسیر به درجه تفکیک بی هنجاری های باقیمانده و ناحیه ای بستگی دارد. بیشتر روش های تفکیک بی هنجاری که شامل روش های مشتق، گسترش به سمت بالا و روند سطحی می باشد، در ارتباط با داده های گرانی می باشد اما بیشتر این روش ها می توانند برای پردازش داده های مغناطیس نیز توسعه یابند [Reynolds, 1997].

۳-۲-۲- روش برگردان به قطب^۱

روش برگردان به قطب جهت تحلیل داده های مغناطیسی مورد استفاده قرار می گیرد. یک توده متقارن در قطب های مغناطیسی که جهت میدان ناحیه ای و پلاریزاسیون در آنها عمودی است یک بی هنجاری متقارن تولید می کند و شکل یک بی هنجاری مغناطیسی فقط به ابعاد فیزیکی و خودپذیری مغناطیسی توده بستگی ندارد بلکه به جهت پلاریزاسیون توده و جهت میدان ناحیه ای نیز وابسته است (هینز ۱۹۹۰) بنابر این روش برگردان به قطب، روشی برای حذف نامتقارنی های ایجاد شده به وسیله میدان ناحیه ای و پلاریزاسیون غیر عمودی می باشد، به عبارت دیگر این روش برای رفع اثرات تغییر شکل ناشی از تغییرات زاویه میل و زاویه انحراف پلاریزاسیون مغناطیسی با فرض این که پلاریزاسیون به وسیله میدان زمین هدایت می شود به کار می رود. رفع این انحراف به وسیله روش برگردان به قطب با تعدیل داده ها به حالت تصویر پلاریزاسیون عمودی در قطب ها انجام می شود و با این روش بی هنجاری ها به مرکز توده های مؤلف بی هنجاری بر می گردند [Dobrin & Savit 1988].

۳-۲-۳- گسترش رو به بالا^۲

این روش برای افزایش پاسخ های منابع عمیق تر و تفکیک این پاسخ ها از پاسخ های منابع کم عمق در جایی که منابع کم عمق نیز موجودند می تواند به کار برده شود [Fedi; Rapolla & Russo, 1999].

^۱ Reduction to the pole

^۲ Upward continuation

۳-۲-۴- گسترش رو به پایین^۱

این روش عکس روش گسترش به سمت بالاست و اثر مؤلفه‌های با عدد موج بالا و بی‌هنجاری منابع سطحی را افزایش می‌دهد. این روش یک ابزار قدرتمند برای مطالعه منابع نزدیک سطح می‌باشد و اما مفید بودن آن به چگونگی رفع نوفه‌هایی که می‌توانند باعث بی‌ثباتی جواب‌ها شوند بستگی دارد [Fedi; Rapolla, and Russo, 1999].

۳-۲-۵- روش روند سطحی^۲

یکی از انعطاف‌پذیرترین تکنیک‌های تحلیلی برای تعیین اثرات ناحیه‌ای روش روند سطحی می‌باشد. در این روش میدان ناحیه‌ای از مقادیر مشاهده شده به وسیله روش حداقل مربعات تقریب زده می‌شود. این روش بر اساس محاسبه سطحی استوار است که بهترین تطابق را نسبت به مقادیر مشاهده شده دارد [Dobrin and Savit, 1988].

۳-۲-۶- روش مشتق قائم^۳

یکی از مشکلات اصلی در کارهای اکتشافی حذف بی‌هنجاری‌های عمیق از بی‌هنجاری‌های سطحی می‌باشد. روش مشتق یک ابزار قدرتمند برای آشکارسازی مؤلفه‌های با عدد موج بلندتر میدان بی‌هنجار می‌باشد. در نقشه‌های مشتق بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و عمیق به دلیل خطی بودن آن خیلی ضعیف بوده و از بین می‌روند، بنابراین بی‌هنجاری‌های سطحی آشکار سازی می‌شوند [Dobrin & Savit, 1988].

¹ Downward Continuation

² Trend Surface

³ Vertical Derivation

۳-۳- تفسیر داده‌های مغناطیسی

در یک عملیات مغناطیسی، مهم‌ترین کاری که انجام می‌گیرد تفسیر داده‌ها می‌باشد. در واقع هدف از تفسیر داده‌ها تعیین عمق، شکل و جنس چشمه مغناطیسی می‌باشد. به طور کلی تفسیر داده‌ها به دو صورت کیفی و کمی انجام می‌شود.

۳-۳-۱- تفسیر کیفی

تفسیر کیفی داده‌ها با استفاده از منحنی پروفیل‌ها یا نقشه‌های پربندی^۱ انجام می‌شود. در این نوع تفسیر با توجه به نقشه‌ها و منحنی‌ها وجود آنومالی مغناطیسی تشخیص داده می‌شود.

۳-۳-۲- تفسیر کمی

امروزه معمولاً برای تفسیر کمی، مدل‌سازی بر روی داده‌ها صورت می‌گیرد. مدل‌سازی داده‌ها به دو روش انجام می‌شود:

۳-۳-۲-۱- روش پیشرو^۲

به طور کلی بی‌هنجاری مغناطیسی ناشی از هر توده مغناطیسی یا گرانی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Delta T(p) = \int_V S(Q) G(p, Q) dv \quad (۳-۲)$$

که در آن p نقطه اندازه‌گیری، Q نقطه‌ای در داخل جسم و V حجم کل جسم می‌باشد. $\Delta T(p)$ بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده در نقطه p می‌باشد. $S(Q)$ تابعی است که مشخصات فیزیکی چشمه (مغناطیدگی یا چگالی) را توصیف می‌کند. $G(p, Q)$ تابعی از موقعیت نسبی دو نقطه p و Q همچنین شکل هندسی چشمه می‌باشد.

^۱ Contour map

^۲ Forward

در روش پیشرو با استفاده از رابطه (۳-۲) بی‌هنجاری مغناطیسی برای مدل‌های مختلف محاسبه می‌شود. یعنی توابع $G(p, Q)$ ، $S(Q)$ و حجم معلوم هستند و با استفاده از آنها بی‌هنجاری مغناطیسی، $\Delta T(p)$ ، به دست می‌آید و منحنی آن رسم می‌شود. سپس منحنی بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده با منحنی‌های محاسبه شده مقایسه می‌شود و پارامترهای مدل (عمق و شکل) به طور مکرر تغییر داده می‌شوند تا بهترین برازش و انطباق بین این دو منحنی ایجاد شود. بدین ترتیب می‌توان عمق و شکل توده را تخمین زد. به طور خلاصه روش پیشرو شامل مراحل زیر است:

۱- محاسبه بی‌هنجاری مدل

۲- مقایسه منحنی بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده با منحنی بی‌هنجاری مدل

۳- تغییر پارامترهای مدل برای بهترین برازش با بی‌هنجاری اندازه‌گیری شده، جهت تخمین پارامترهای چشمه

۳-۳-۲- روش معکوس^۱

در روش معکوس تنها بی‌هنجاری ناشی از چشمه یعنی $\Delta T(p)$ معلوم است و هدف تعیین مشخصات فیزیکی و شکل چشمه یعنی توابع $G(p, Q)$ و $S(Q)$ می‌باشد. حل مسأله معکوس نیز به دو روش انجام می‌شود:

۱- $S(Q)$ تابعی معلوم فرض می‌شود و شکل هندسی چشمه به دست می‌آید که این یک مسأله معکوس غیر خطی است.

۲- شکل هندسی چشمه، $G(p, Q)$ ، معلوم فرض می‌شود و هدف به دست آوردن مشخصات فیزیکی چشمه است که این یک مسأله معلوم خطی می‌باشد.

¹ Inverse

مشکل اصلی در روش پیشرو و معکوس این است که جواب‌های به‌دست آمده یکتا نمی‌باشند. یعنی مدل‌های گوناگون با شکل و مشخصات مختلف می‌توانند بی‌هنجاری‌های یکسانی را ایجاد کنند. یکی از روش‌های حل این مشکل اعمال یک سری محدودیت‌ها بر روی چشمه می‌باشد. این محدودیت‌ها را می‌توان با استفاده از اطلاعات به‌دست آمده از سایر روش‌های ژئوفیزیکی، اطلاعات زمین شناسی منطقه و یا داده‌های ژئوفیزیکی مستقل (مانند اندازه‌گیری مغناطیدگی) بر روی جسم اعمال کرد.

فصل چهارم

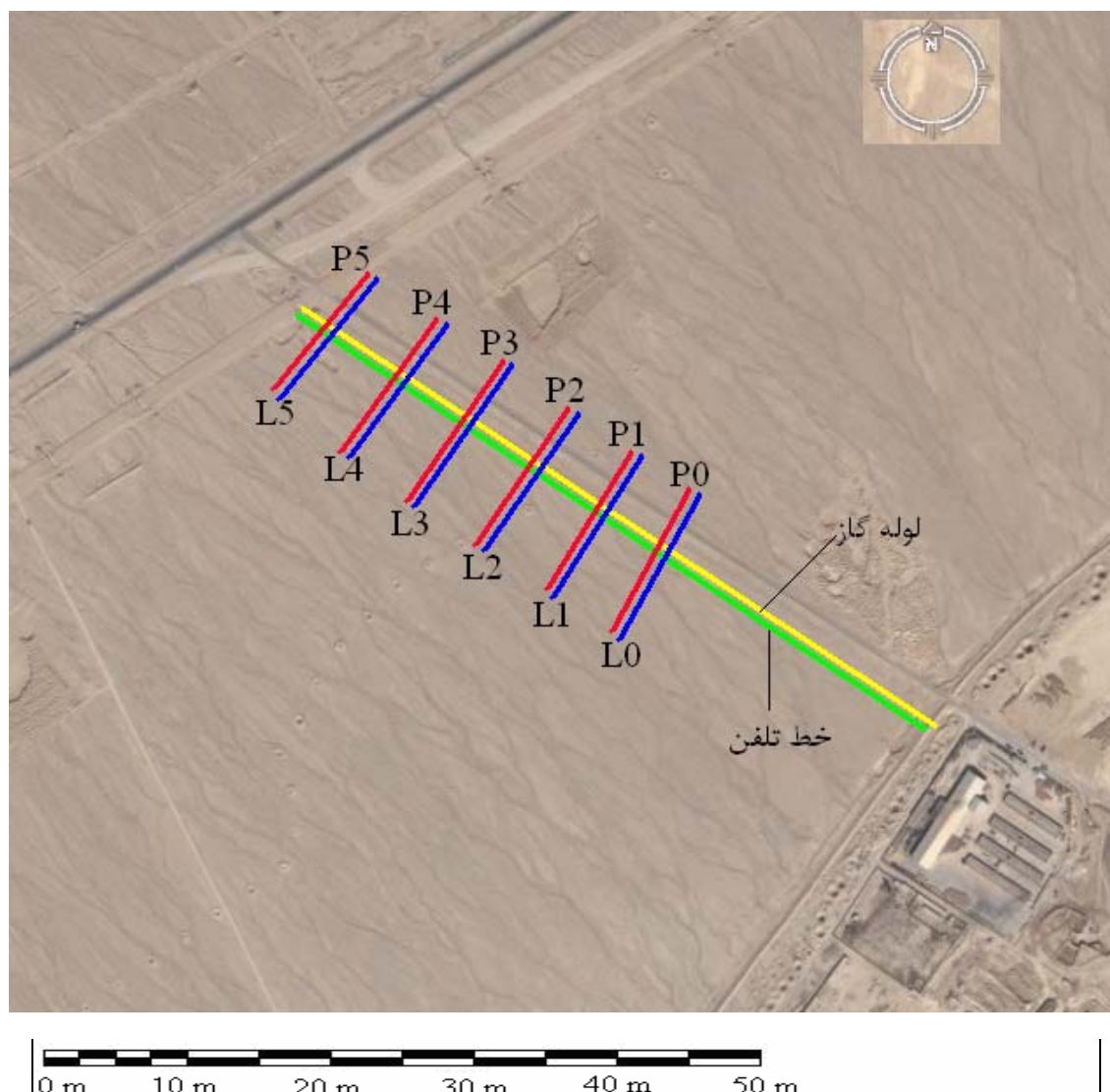
برداشتهای دوبعدی GPR و مغناطیس

۴-۱- برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های GPR منطقه قلعه شوکت

هدف از این برداشت تعیین محل یا موقعیت و عمق دفن‌شدگی خط لوله گاز شهری است. این لوله به منظور تأمین سوخت مصرفی کارخانه آجرسازی در ناحیه قلعه شوکت تعبیه شده است. لوله مزبور از جنس فولاد می‌باشد که با لایه‌ای از قیر عایق‌بندی شده است. همچنین قطر لوله مورد نظر ۸ اینچ بوده و عمق دفن‌شدگی آن در حدود یک متری از سطح زمین است (طبق اطلاعات گرفته شده از شرکت گاز شاهرود).

در این بررسی به منظور دستیابی به حداکثر پاسخ‌ها، پروفیل‌های برداشت به صورت عمود بر امتداد خط لوله گاز انتخاب شده‌اند. به موازات خط لوله، خطوط انتقال نیروی برق ۵۰ هرتز و خط تلفن (تابلوهای مخصوص شرکت مخابرات بر روی مسیر خط تلفن در منطقه برداشت قابل مشاهده‌اند) در نزدیکی لوله مزبور در زمین دفن شده‌اند. علاوه بر این جاده آسفالت‌های نیز با همین امتداد جزئی از منطقه برداشت داده‌ها است. از این رو سعی شده است که این موارد نیز در این مطالعه بررسی شوند.

شکل ۴-۱ عکس هوایی از منطقه برداشت (منطقه قلعه شوکت) و پروفیل‌های GPR و پروفیل‌های مغناطیس در نظر گرفته شده (پروفیل صفر یا L0,P0 تا پروفیل ۵ یا L5,P5) را نشان می‌دهد. در این شکل امتداد لوله گاز و خط تلفن عبوری از منطقه مزبور به همراه ۶ پروفیل GPR برداشت شده که با حرف P0 تا P5 مشخص شده و ۶ پروفیل مغناطیس برداشت شده که با حرف L0 تا L5 مشخص شده، نمایش داده شده است.



شکل ۴-۱: عکس هوایی از منطقه برداشت و پروفیل‌های GPR برداشت شده بر روی لوله گاز و خط تلفن در ناحیه قلعه

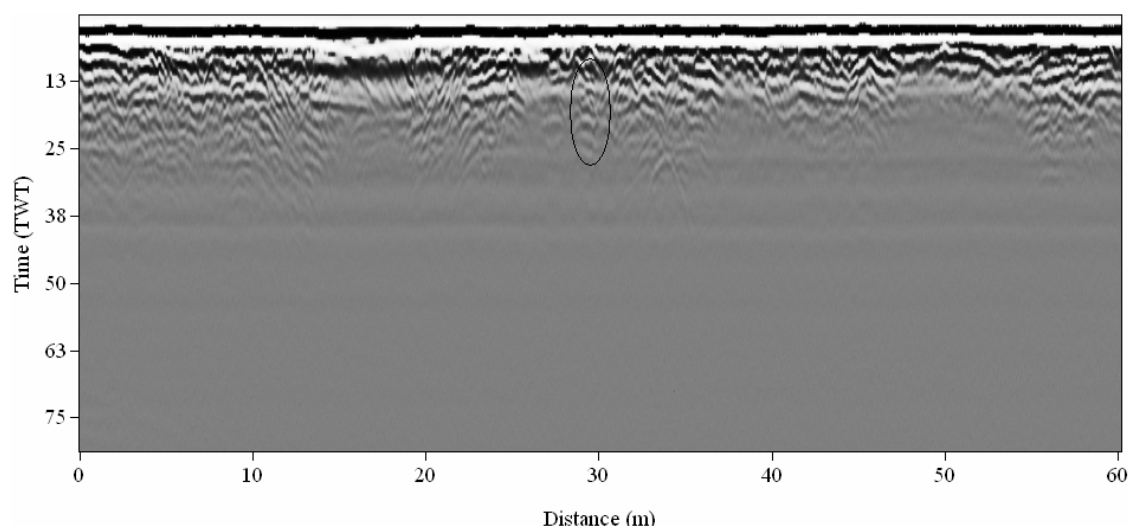
شوکت [www.Googleearth.com]

۴-۱-۱- پروفیل صفر

در ناحیه قلعه شوکت ۶ پروفیل GPR به طول ۶۰ متر با فواصل پרוپیلی ۱۰۰ متر برداشت شده است. پروفیل صفر اولین پروفیل برداشت با طول ۶۰ متر بوده و با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی بر روی خط لوله گاز در نظر گرفته شد. جاده آسفالت، لوله گاز و خط تلفن در این منطقه به صورت موازی با

هم قرار گرفته و در امتداد شمالی-جنوبی هستند. داده‌های GPR در این مطالعه، توسط دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شدند.

آنتن مورد استفاده برای اکتساب داده‌های GPR، آنتن پوششی^۱ با فرکانس مرکزی ۲۵۰ مگاهرتز می‌باشد. در شکل ۲-۴ مقطع زمانی داده‌های GPR برای این پروفیل با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک (AGC)^۲ به نمایش درآمده است.



شکل ۲-۴: مقطع زمانی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک

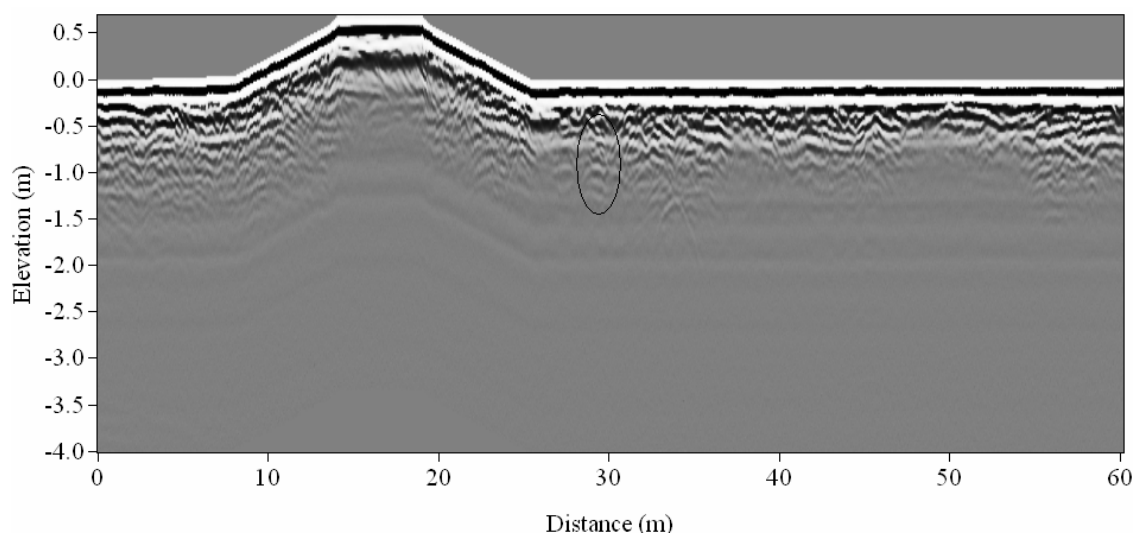
خطوط نیروی فشارقوی که به واسطه تیرهای بتونی به موازات این جاده انتقال داده می‌شوند، تقریباً در ۵۰ سانتیمتری اول این پروفیل قرار دارند. اما در شکل ۲-۴ اثری نامطلوب مربوط به این ساختارها بر روی داده‌های GPR مشاهده نمی‌شود. این امر به علت استفاده از آنتن‌های پوششی (حفاظدار) و همچنین فاصله نسبی آنتن GPR با ساختارهای فلزی موجود در سطح زمین است. یک بی‌هنجاری قابل توجه در ۱۲/۵ تا ۱۹ متری پروفیل قابل تشخیص است. در این بی‌هنجاری به صورت قابل

^۱ Shielded

^۲ Automatic Gain Control

توجهی شکل بازتاب‌ها تغییر کرده است و به صورت یک محیط نسبتاً همگن در مقطع GPR دیده می‌شود. جاده آسفالتی که در ابتدای این فصل به آن اشاره شد، سبب این بی‌هنجاری است. آشکارسازی این ساختار تأکیدی بر قابلیت روش GPR حتی در آشکارسازی ناپیوستگی‌های جانبی است.

جاده مذکور نسبت به اطراف آن دارای ارتفاع بیشتری است و در کناره‌ها با شیب تندتری به سطح زمین می‌رسد. همان‌طور که در شکل ۳-۴ دیده می‌شود بازتاب‌های زیر سطحی در کناره‌های این جاده به صورت غیرطبیعی در فواصل ۱۲/۵ و ۱۹ متری پروفیل دارای شیب تندی به سمت جاده می‌باشند. این امر ناشی از افزایش ارتفاع زمین در محل عبور جاده مذکور است. برای نمایش ساختارهای زیرسطحی در مکان و عمق صحیح‌شان، اعمال تصحیحات توپوگرافی در چنین مواردی بسیار با اهمیت است. فایل مربوط به توپوگرافی پروفیل برداشت به صورت مجزا در نرم‌افزارهای ویرایش متن (نظیر Note Pad) ساخته شده و با استفاده از نرم‌افزار Win_EKKO Pro بازخوانی می‌شوند.



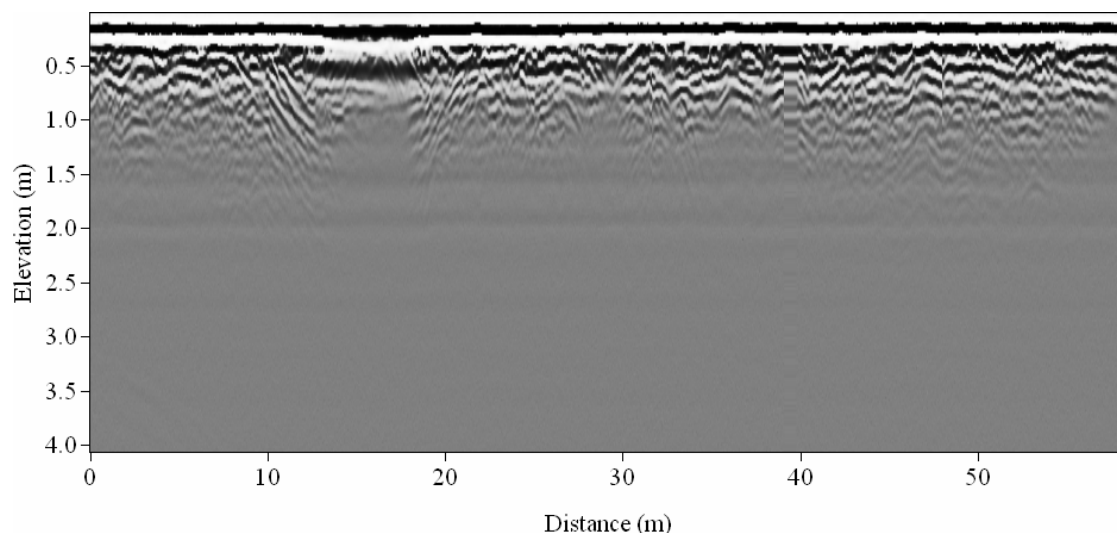
شکل ۳-۴: مقطع عمقی پروفیل صفر با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود پس از اعمال تصحیح توپوگرافی بازتاب‌ها به مکان واقعی خود انتقال داده می‌شوند. محل قرارگیری این جاده در هر پروفیل تا حدودی متفاوت با پروفیل‌های قبلی است. از این رو برای هر یک از پروفیل‌های برداشت، یک فایل توپوگرافی مجزا مورد نیاز می‌باشد. همان‌طور که ذکر شد در فاصله ۱۴ الی ۱۹ متری شکل ۲-۴ و ۳-۴ تغییرات بارزی در مقطع GPR دیده می‌شود. تغییرات لایه‌بندی و دانه‌بندی و همچنین اختلاف جنس مواد بکار رفته در ساخت جاده مزبور نسبت به خاک و رسوبات اطراف آن سبب ایجاد این تغییرات است. در زیر جاده یک بازتاب نزدیک به سطح دیده می‌شود. این بازتاب از آنجا که از فصل مشترک کم عمقی نشأت گرفته است، با امواج مستقیم دارای هم‌پوشانی است. بازتابی که در این ناحیه مشاهده می‌شود ناشی از شن‌ریزی است که به منظور زیرسازی جاده در نظر گرفته شده است. در اعماق بیشتر این ناحیه رویدادهای بازتابی قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. این امر به دلیل همگن و یکنواخت بودن خاکی است که به منظور بالا بردن سطح ارتفاع جاده به شکل خاکریز ایجاد شده است. با ایجاد این خاکریز شکل لایه‌بندی رسوبات در اطراف جاده مزبور که در مقطع GPR قابل تشخیص است، به هم خورده و به شکل یکنواخت در آمده است.

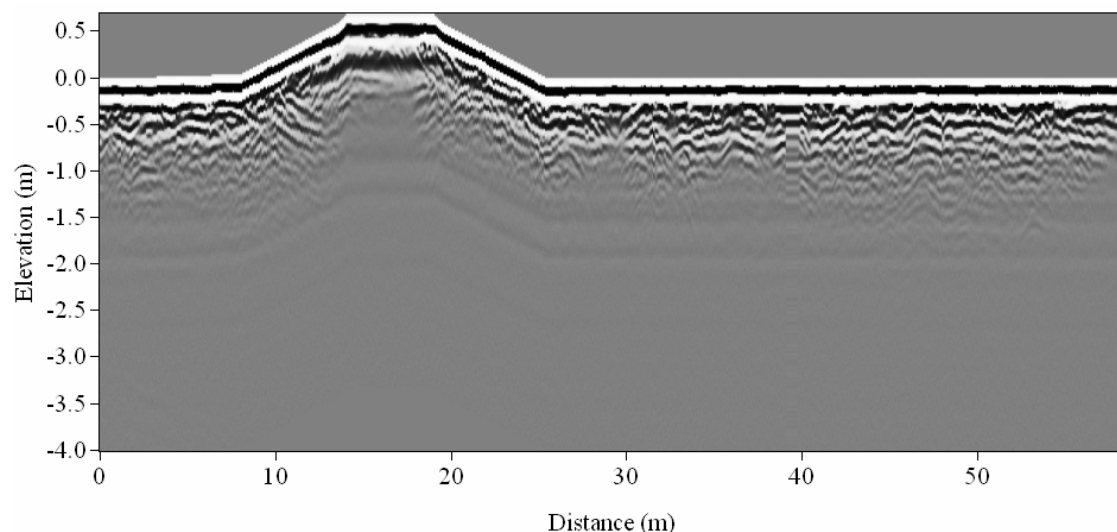
در فاصله ۲۹ متری پروفیل یک بی‌هنجاری قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری منطبق بر محل عبور لوله گاز است. معمولاً اطراف لوله‌های گاز را با خاک نرم پر می‌کنند که این خاک نرم به میزان قابل توجهی رسی و ریزدانه می‌باشد. چنین محیط‌هایی رسا بوده و امواج الکترومغناطیس در آن به شدت اتلاف (میرا) می‌شوند. بنابر این بازتاب‌های ضعیف در این ناحیه می‌تواند ناشی از لوله و خاک اطراف آن و حتی تراشه حفاری شده به منظور دفن لوله باشند. وجود درصد بالای رس در خاک منطقه باعث ایجاد محیطی پر اتلاف شده است، به طوری که در اعماق بیشتر از ۱/۵ متر در مقاطع GPR بازتابی مشاهده نمی‌شود.

۴-۱-۲- پروفیل ۱

این پروفیل به فاصله ۱۰۰ متری از پروفیل صفر و به موازات آن به طول ۶۰ متر در نظر گرفته شد.



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



شکل ۴-۵: مقطع عمقی پروفیل ۱ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

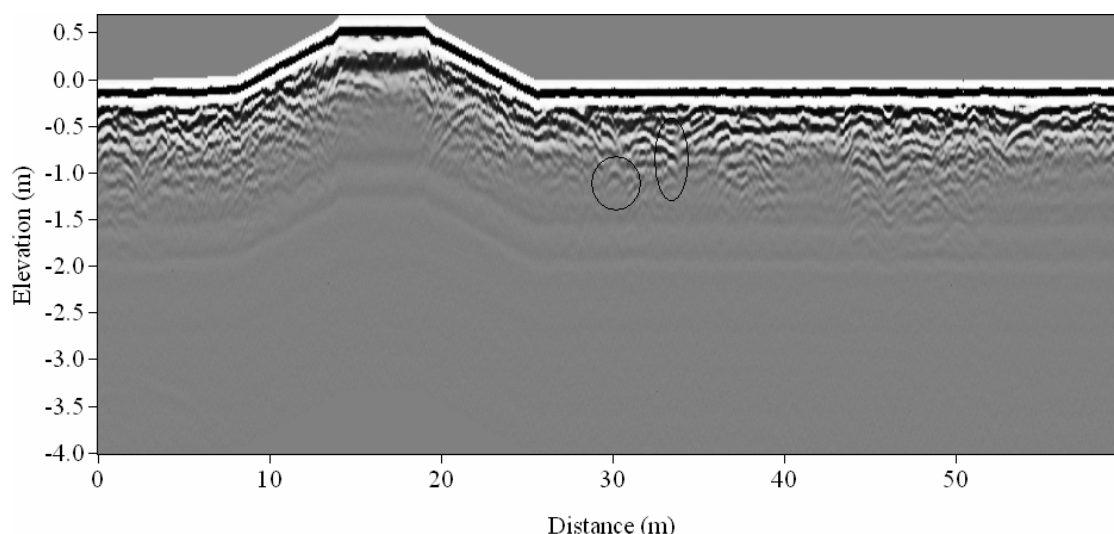
همان‌طور که در شکل ۴-۴ و ۴-۵ مشاهده می‌شود بی‌هنجاری مربوط به جاده از ۱۳/۵ متری پروفیل شروع و تا ۱۸/۵ متری آن امتداد دارد. در محل عبور لوله گاز و خط تلفن در ۲۹ و ۳۳ متری امتداد

پروفیل بی‌هنجاری قابل توجهی دیده نمی‌شود. این مطلب ناشی از پراکندگی بودن منطقه برداشت و واقع شدن لوله در اعماق بالاتر از عمق نفوذ امواج GPR است. امواج ارسال شده به درون زمین به سرعت در این محوطه تضعیف می‌شوند. بطوری که در عمقی که لوله قرار دارد انرژی آنها به اندازه‌ای نیست که بازتابی که از لوله‌های فلزی مورد انتظار است، حاصل شود.

در فاصله ۴۷ و ۵۳ متری امتداد پروفیل دو بی‌هنجاری دیده می‌شود. این بی‌هنجاری‌ها از ساختارهای زیرسطحی ناشی نشده‌اند و تنها توپوگرافی سطح زمین در طول پروفیل برداشتی این بی‌هنجاری‌ها را سبب شده است. در این نواحی دو گودال با عمق تقریبی ۰/۵ متر و عرض کم وجود دارد. هنگام عبور دستگاه GPR از روی این گودال‌ها کف دستگاه از سطح زمین جدا شده و تماس لازم را با زمین نداشته است. این امر باعث می‌شود امواج الکترومغناطیس قبل از ارسال به درون زمین از هوا عبور کنند. هوا یک محیط کم‌پراکندگی [Annan, 2001] برای امواج محسوب می‌شود و امواج در آن دارای سرعت بالایی هستند. با عبور امواج از این ناحیه موج مستقیم زمینی با تأخیر زمانی قابل توجهی به آنتن گیرنده می‌رسد. این امر باعث به وجود آمدن یک فضای خالی در مقطع می‌شود. علاوه بر این بازتاب‌های چندگانه بین آنتن‌ها و کف گودال سبب ایجاد بازتاب‌های سهمی شکل چندگانه‌ای است که به خصوص در ۴۷ متری پروفیل قابل تشخیص می‌باشند.

۴-۱-۳- پروفیل ۲

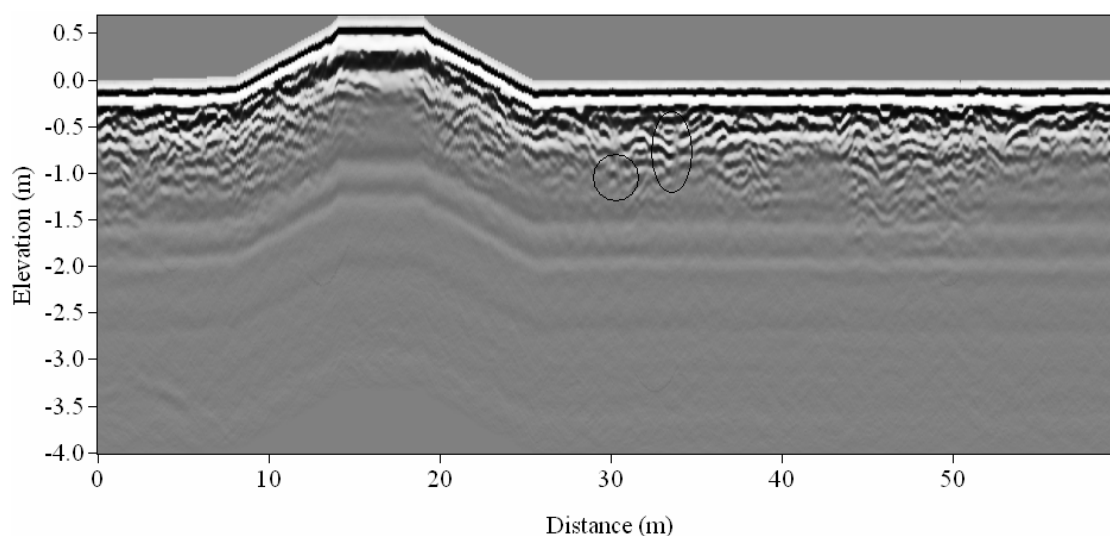
در شکل ۴-۶ مقطع عمقی پروفیل ۲ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک، پس از اعمال تصحیح توپوگرافی به نمایش درآمده است.



شکل ۴-۶: مقطع عمقی پروفیل ۲ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

همانند پروفیل‌های قبل در اینجا نیز اثر جاده در فاصله ۱۴ متری پروفیل به خوبی قابل تشخیص است. در فاصله ۳۰ متری از پروفیل همان‌طور که در شکل ۴-۶ با دایره مشخص شده است، یک بازتاب ضعیف هذلولی شکل در محدوده عبور لوله و در عمق یک متری مشاهده می‌شود. این بازتاب می‌تواند ناشی از لوله گاز در این عمق باشد. نظیر این چنین بازتاب‌هایی در تمام طول پروفیل دیده می‌شود. از این رو نسبت دادن این بی‌هنجاری به لوله گاز تنها با استناد به منطبق بودن محل این بی‌هنجاری به محل دفن لوله، با ابهاماتی همراه است. به منظور ارائه تفسیر صحیح و منطقی از بی‌هنجاری مورد بررسی، دامنه پردازش داده‌ها افزایش داده شده است. در شکل ۴-۷ مقطع عمقی مهاجرت یافته این پروفیل به ازاء سرعت متوسط ۰/۱ متر بر ثانیه به نمایش درآمده است. همان-

طور که دیده می‌شود در شکل ۴-۷، بی‌هنجاری موردنظر پس از اعمال پردازش مهاجرت به یک هدف نقطه‌ای تبدیل شده است. این هدف نقطه‌ای همان نقطه‌ای است (لوله گاز) که هذلولی مورد نظر آن پراشیده شده است. موارد مذکور که اشاره به اصول پردازش مهاجرت دارد، احتمال ناشی بودن بی-هنجاری مزبور را از لوله مورد مطالعه، افزایش می‌دهد.



شکل ۴-۷: مقطع عمقی پروفیل ۲ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از پردازش مهاجرت، بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

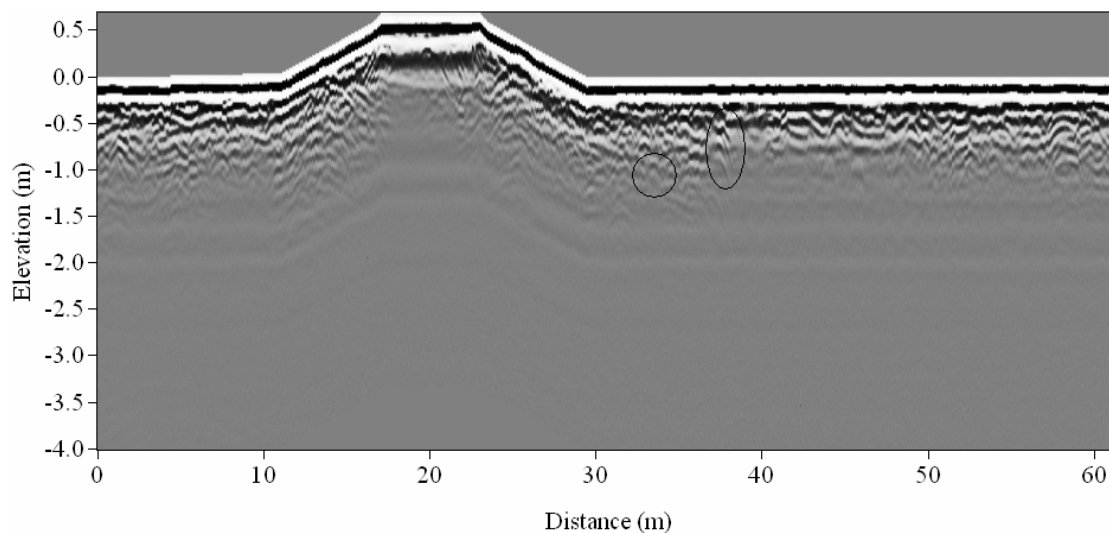
همان‌طور که ذکر شد پردازش مهاجرت بازتاب‌های هذلولی شکل حاصل از بازتاب‌کننده‌های نقطه‌ای را به جایگاه اصلی باز می‌گرداند.

در فاصله ۳۳/۵ متری از پروفیل ۲ که با بیضی در هر دو شکل ۴-۶ و ۴-۷ مشخص شده است، یک سری بازتاب‌های مکرر به چشم می‌خورد. این بی‌هنجاری از عمق ۰/۴ متر تا عمق ۱ متری امتداد یافته است. این بی‌هنجاری منطبق بر محل عبور خط تلفنی است که به موازات لوله انتقال گاز، از این منطقه عبور کرده است. به وجود آمدن هذلولی‌های مکرر در این مورد به خاطر نزدیک به سطح بودن بازتاب‌کننده یعنی خط تلفن که در عمق ۰/۴ متری قرار گرفته می‌باشد.

بی‌هنجاری‌های دیگری که در این پروفیل مشاهده می‌شود، دو به هم ریختگی در ۴۴/۵ و ۵۴ متری در انتهای پروفیل است که منشا ایجاد آنها توپوگرافی و گودال در این دو ناحیه می‌باشد.

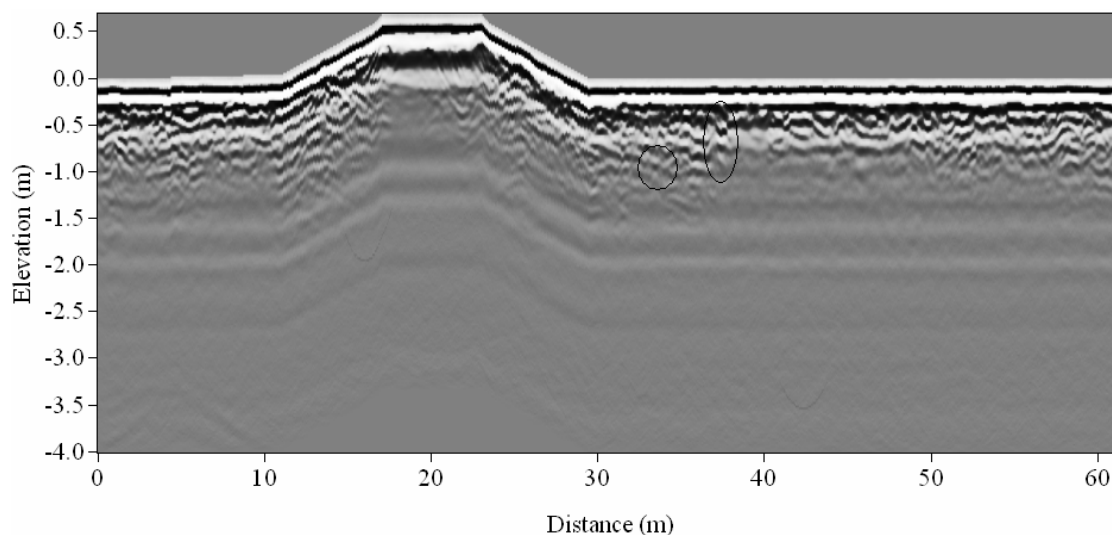
۴-۱-۴- پروفیل ۳

در شکل ۸-۴ مقطع عمقی پروفیل ۳ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی، به نمایش درآمده است. همانند پروفیل‌های قبل، جاده مزبور از ۱۶ متری تا ۲۲ متری پروفیل قابل تشخیص است. بی‌هنجاری مربوط به لوله گاز که در شکل ۸-۴ با دایره مشخص شده است، به شکل ضعیفی خود را در فاصله ۳۳/۵ متری و در عمق یک متری نشان می‌دهد. در فاصله ۳۷/۵ متری از پروفیل که در شکل ۸-۴ با بیضی مشخص شده، بی‌هنجاری مربوط به خط تلفن به صورت بارزتری قابل تشخیص است.



شکل ۸-۴: مقطع عمقی پروفیل ۳ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

اهدافی از قبیل کابل‌ها و لوله‌های با قطر کم نسبت به طول موج فرکانس مرکزی آنتن مورد استفاده، اهداف نقطه‌ای محسوب می‌شوند. با اعمال پردازش مهاجرت بازتاب‌های هذلولی شکل ناشی از این قبیل اهداف به مکانی که از آن پراشیده شده‌اند، باز می‌گردند.



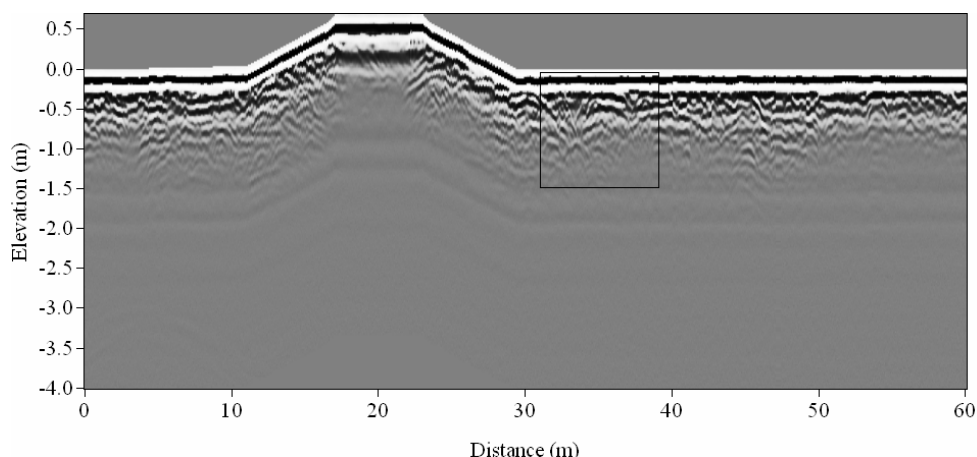
شکل ۴-۹: مقطع عمقی پروفیل ۳ با اعمال فیلتر Dewow و پردازش مهاجرت، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

با مقایسه شکل‌های ۴-۸ و ۴-۹ برای لوله گاز و خط تلفن مشاهده می‌شود که پس از اعمال پردازش مهاجرت هذلولی‌های پراش ناشی از حضور لوله گاز و خط تلفن به صورت اهداف نقطه‌ای در شکل ۴-۹ دیده می‌شوند.

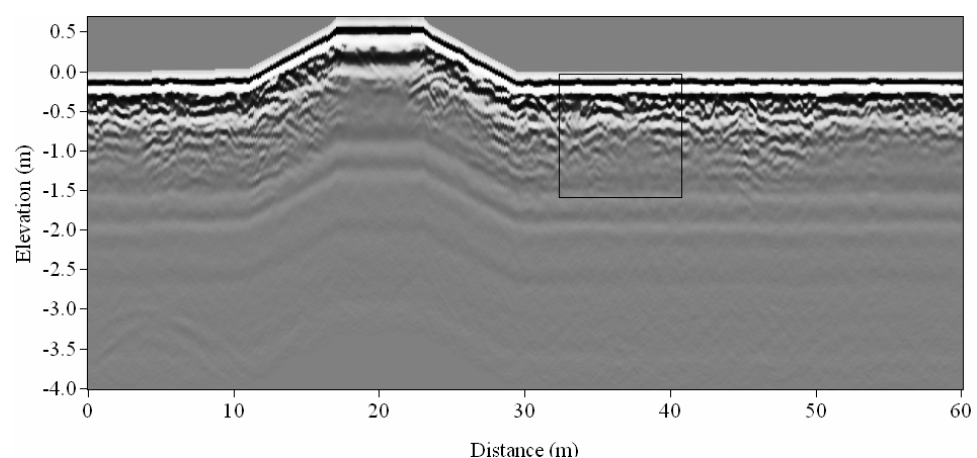
۴-۱-۵- پروفیل ۴

مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی در شکل ۴-۱۰ به نمایش درآمده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، اثری از لوله گاز و خط تلفن در این پروفیل مشاهده نمی‌شود.

محل تقریبی حضور لوله گاز و خط تلفن در این مقطع به صورت مربع مشخص شده است. همچنین مقطع عمقی این پروفیل با اعمال پردازش مهاجرت در شکل ۴-۱۱ به نمایش درآمده است. همان‌طور که دیده می‌شود، به دلیل عدم وجود پاسخ از اهداف مورد نظر و یا ضعیف بودن این بازتاب‌ها تغییرات خاصی در مقاطع مذکور مشاهده نمی‌شود. واقع شدن اهداف در اعماق بیشتر، افزایش میزان رسوبات دانه ریز اطراف لوله در محل این پروفیل می‌تواند از دلایل این امر باشد. از طرفی وجود بازتاب‌های نامنظم ناشی از لایه‌بندی رسوبات و هم‌پوشانی پاسخ آنها با پاسخ اهداف مورد بررسی، تفکیک این پاسخ‌ها را مشکل ساخته است.



شکل ۴-۱۰: مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی



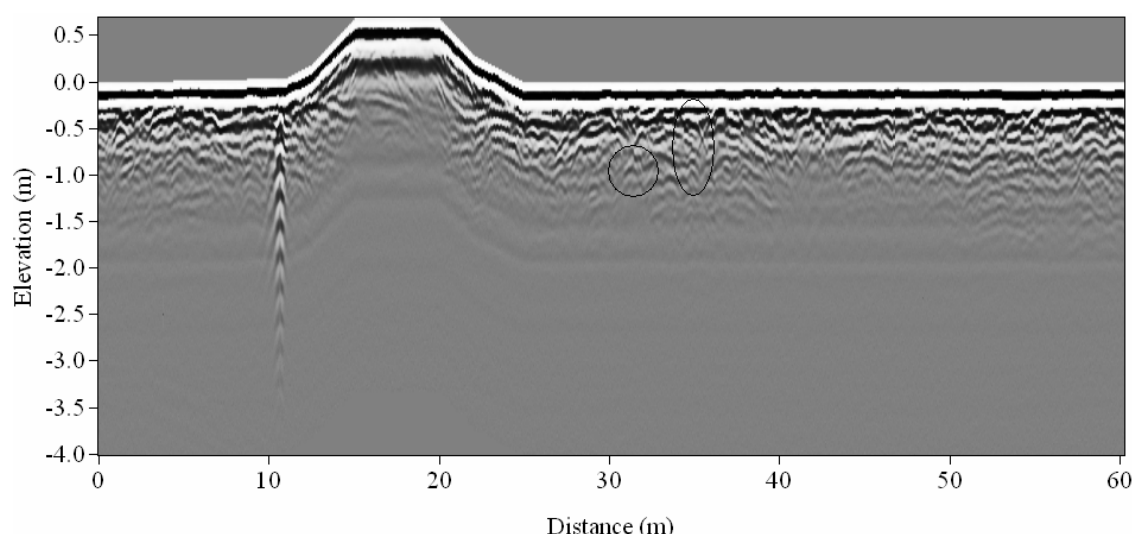
شکل ۴-۱۱: مقطع عمقی پروفیل ۴ با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال

تصحیح توپوگرافی

۴-۱-۶- پروفیل ۵

در شکل ۴-۱۲ مقطع عمقی پروفیل ۵ به نمایش درآمده است.

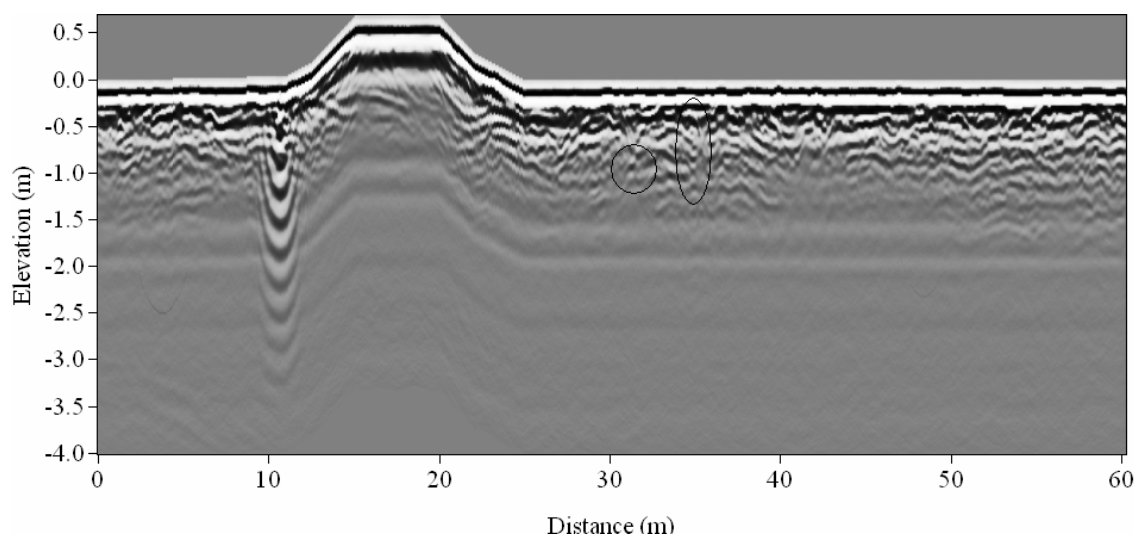
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در فاصله ۱۰/۵ متری پروفیل یک بی‌هنجاری قابل توجه به چشم می‌خورد. این بی‌هنجاری تقریباً از سطح زمین تا عمق ۳/۵ تا ۴ متری امتداد یافته است.



شکل ۴-۱۲: مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر Dewow، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

طبق اطلاعات اکتسابی از کارشناسان شرکت گاز و مخابرات در این موقعیت، ساختار مدفونی موجود نیست. این بازتاب‌های با دامنه بالا می‌توانند از ساختارهای فلزی نزدیک سطح ناشی شده باشند. پس از مشاهده این بی‌هنجاری در هنگام برداشت داده‌ها، محل مورد نظر حفاری گردید. پس از ۲۰، ۳۰ سانتیمتر حفر منطقه، مقداری زباله سوخته در محل یافت شد. قسمت اعظم این زباله‌های سوخته بازمانده‌های فلزی و فلزات زنگ‌زده (اکسیده شده) می‌باشند. فلزات و همچنین اکسید آنها که جزء مواد با رسانندگی بالا هستند. نزدیک سطح بودن این ساختارها با وجود حجم کم آنها بر خلاف آنچه در نگاه اول تصور می‌شد، پدید آورنده چنین بازتابی شده است. گستردگی قابل توجه این بازتاب‌ها از سطح به عمق، ممکن است این تصور غلط را سبب شود که این توده رسانا از سطح به عمق گسترش

یافته است. وجود چنین بازتاب‌های گسترده‌ای تنها به دلیل حلقوی شدن^۱ امواج GPR به واسطه حضور توده‌های رسانای نزدیک سطح است. در تفسیر مقاطع GPR چنین پدیده‌هایی بایستی به خوبی مد نظر قرار گیرند تا منجر به ارائه تفسیر غلط از ساختارهای مورد بررسی نگردد. مشاهده تأثیر پردازش مهاجرت در بررسی چنین بی‌هنجاری‌هایی بسیار مؤثر است. به همین منظور این پروفیل بعد از اعمال پردازش مهاجرت در شکل ۴-۱۳ به نمایش درآمده است.



شکل ۴-۱۳: مقطع عمقی پروفیل ۵ با اعمال فیلتر Dewow، پردازش مهاجرت، استفاده از بهره اتوماتیک و اعمال تصحیح توپوگرافی

همان‌طور که در شکل ۴-۱۳ دیده می‌شود، با اعمال پردازش مهاجرت، بازتاب‌های مکرر ناشی از زباله‌های فلزی تغییر جهت یافته‌اند و به صورت گسترده‌تری دیده می‌شوند. این امر از آنجا ناشی می‌شود که پردازش مهاجرت در بازسازی بازتاب‌های ناشی از اهداف فلزی نزدیک سطح (ردهای رینگی شده) ناموفق است. از این‌رو می‌توان چنین نتیجه گرفت که یکی از راه‌های تشخیص این گونه بی‌هنجاری‌ها، اعمال پردازش مهاجرت بر روی داده‌ها است. همچنین در فاصله ۳۱/۲ متری و ۳۵ متری پروفیل اثر

^۱ Ringing

لوله گاز و خط تلفن قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری‌ها توسط دایره و بیضی به ترتیب برای لوله گاز و خط تلفن در شکل‌های ۴-۱۲ و ۴-۱۳ مشخص شده‌اند.

۴-۲- پردازش و تفسیر داده‌های مغناطیس ناحیه قلعه شوکت

در ناحیه قلعه‌شوکت ۶ پروفیل در جهت شمال شرقی- جنوب غربی منطبق بر پروفیل‌های برداشت شده با روش GPR، و عمود بر خط لوله گاز عبور کرده از منطقه، با دستگاه مغناطیس‌سنج پروتون برداشت شده است. این پروفیل‌ها به طول ۶۰ متر با فاصله ایستگاهی ۱ متر بوده و به طور موازی در فاصله ۱۰۰ متری از همدیگر واقع شده‌اند. به دلیل در دست نبودن نقاط GPS به ازاء هر ایستگاه برداشت شده، یک مختصات محلی X و Y برای شبکه برداشت شده تعریف کرده‌ایم، به طوری که امتداد پروفیل‌ها که عرض شبکه را تشکیل می‌دهند در جهت محور Y یعنی ایستگاه اول در هر پروفیل در نقطه $Y=0$ و ایستگاه آخر در نقطه $Y=60$ واقع شده‌اند، همچنین طول شبکه که محل قرار گیری ۶ پروفیل برداشت شده است در جهت محور X است، به صورتی که اولین پروفیل یعنی $L0$ در نقطه $X=0$ و آخرین پروفیل یعنی $L5$ در نقطه $X=500$ واقع شده است، یعنی ۵۰۰ متر بین اولین و آخرین پروفیل فاصله وجود دارد. هدف از این برداشت آشکارسازی خط لوله گاز است، اما در منطقه مزبور یک خط انتقال برق فشار قوی در ابتدای پروفیل‌ها و یک خط تلفن نیز تقریباً به فاصله ۲/۵ متر از خط لوله گاز و به موازات خط لوله گاز وجود دارند که حضور آنها بر داده‌ها بی‌تأثیر نیست، بنابر این در طی پردازش و تفسیر داده‌ها اثر ناشی از این بی‌هنجاری‌ها نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

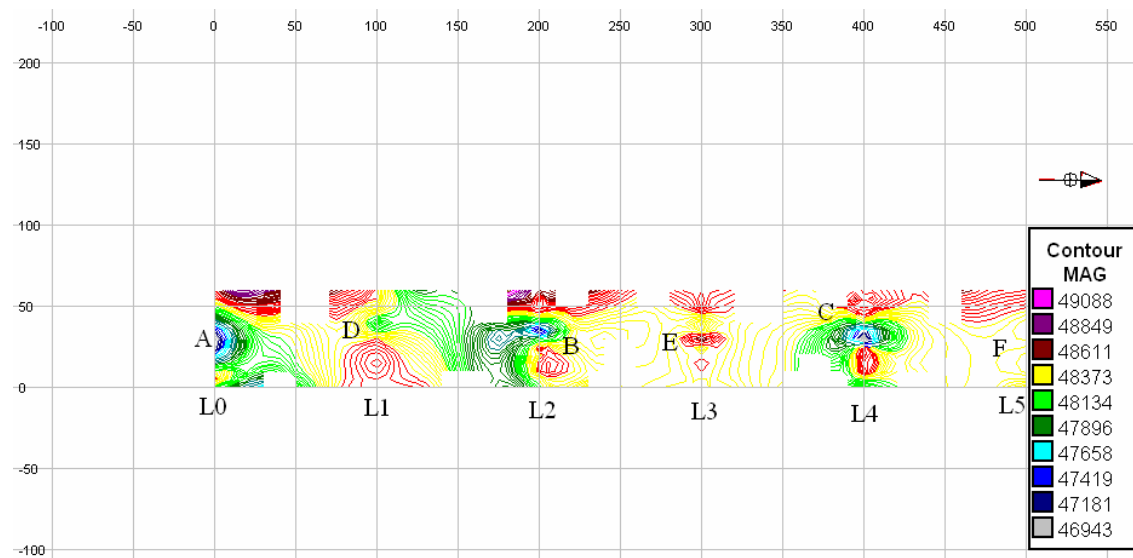
رسوب‌گذاری منطقه بیشتر رس و سیلت می‌باشد و هدفی که ما به دنبال آن هستیم فلزی بوده و دارای مغناطیس بالایی است. پس از تصحیح روزانه و اعمال داده‌های قرائت شده در ایستگاه مبدأ^۱ بر روی داده‌های خام مغناطیس برداشت شده، نقشه‌های پربندی^۲ میدان مغناطیس کل، برگردان به قطب و همچنین برخی از فیلترهای معمول که برای تفسیر کیفی داده‌های مغناطیس مورد استفاده

^۱ Base

^۲ Contour

قرار می‌گیرند، توسط نرم‌افزار Model Vision Pro رسم شده است که در ادامه نتایج به همراه شکل-های مربوطه توضیح داده خواهد شد. شدت میدان مغناطیسی کل منطقه برابر ۴۸۵۰۰ نانوتسلا و تمامی نقشه‌ها با فاصله پربندی ۲۰ نانوتسلا رسم شده‌اند. با توجه به اینکه میدان کل برداشت شده ناشی از همه مواد مغناطیسی سطحی و عمیق (سنگ کف)^۱ می‌باشد و ما به دنبال بی‌هنجاری هستیم که در عمق کم واقع شده است، فیلترهای مختلفی مانند برگردان به قطب، روند سطحی، گسترش رو به پایین، مشتقات و شبه مقطع گرانی را اعمال کرده‌ایم که فیلترهای مشتقات و شبه گرانی به خاطر پایین بودن مغناطیس منطقه و فیلتر گسترش رو به بالا به خاطر اینکه به دنبال بی-هنجاری‌های سطحی هستیم در اینجا آورده نشده است.

نقشه پربندی مغناطیس کل در شکل ۴-۱۴ آورده شده است همان‌طور که از روی این شکل مشاهده می‌شود داده‌های برداشت شده در ۶ پروفیل به صورت پربندی توسط نرم‌افزار Modelvision به نقشه درآمده است.



شکل ۴-۱۴: نقشه مغناطیس کل

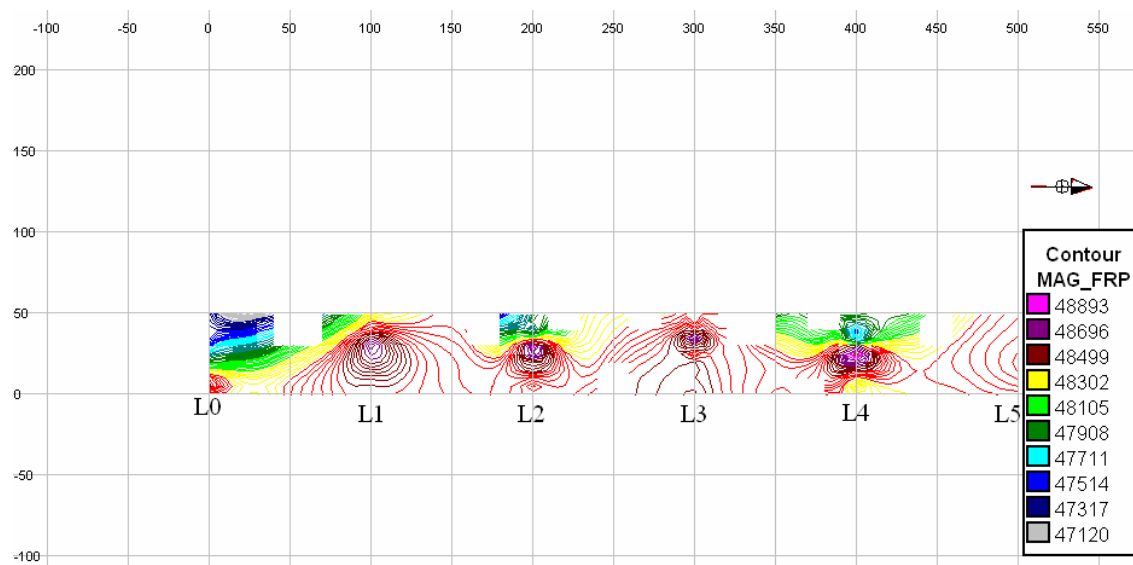
^۱Basement

نکته قابل توجهی که در اینجا لازم به اشاره است، نمایش پربندی داده‌ها در این بخش بیشتر به جهت بررسی تأثیر اعمال فیلترها بر روی داده‌های برداشت شده می‌باشد، زیرا به دلیل نامناسب بودن نسبت فواصل ایستگاه‌های برداشت به فواصل بین پروفیل‌ها که یک نسبت ۱ به ۱۰۰ (فواصل بین ایستگاه‌ها ۱ متر و فواصل بین پروفیل‌ها ۱۰۰ متر) است، قادر به ایجاد یک شبکه استاندارد نشده‌ایم و شکل نقشه‌های پربندی رسم شده رضایت بخش نیست.

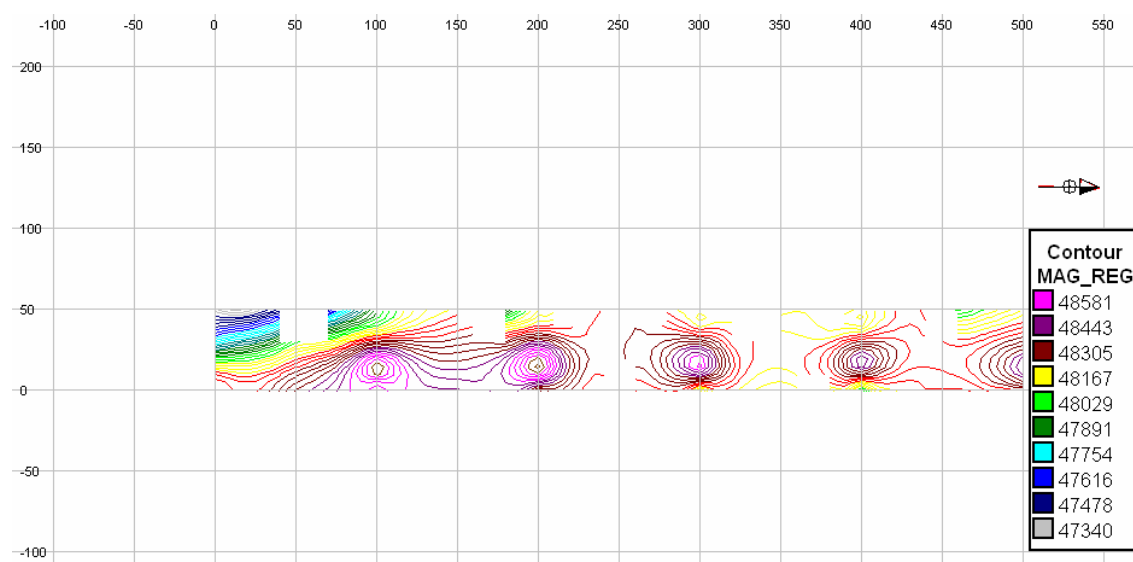
در شکل ۴-۱۴ شاهد سه زون منفی در پروفیل‌های صفر، ۲ و ۴ هستیم که به ترتیب با حروف A، B و C مشخص شده‌اند، و سه زون مثبت در پروفیل‌های ۱، ۳ و ۵ که با حروف D، E و F مشخص شده است، که این امر می‌تواند ناشی از نحوه برداشت داده‌ها باشد. برداشت داده‌ها به صورت رفت و برگشت بوده، به طوری که در پروفیل صفر ما از ابتدای پروفیل برداشت را شروع کرده و در پروفیل ۱ عمل برداشت را از انتهای پروفیل شروع کرده‌ایم، دیگر پروفیل‌ها را نیز به همین نحو برداشت شده‌اند. تمام بی‌هنجاری‌های مشاهده شده تقریباً در محدوده ۳۳ متری این ۶ پروفیل واقع شده‌اند، که منطبق بر عبور خط لوله گاز و خط تلفن است (طبق مشاهده علائم مربوط به عبور خط لوله گاز و کابل تلفن در ۳۰ متری طول پروفیل‌ها، که توسط شرکت گاز و اداره مخابرات نسب شده است).

به‌خاطر فاصله کم بین دو بی‌هنجاری ناشی از خط لوله گاز و خط تلفن در پروفیل‌های مزبور، پاسخ-های ناشی از لوله گاز و کابل تلفن در شکل ۴-۱۴ قابل تفکیک نیست.

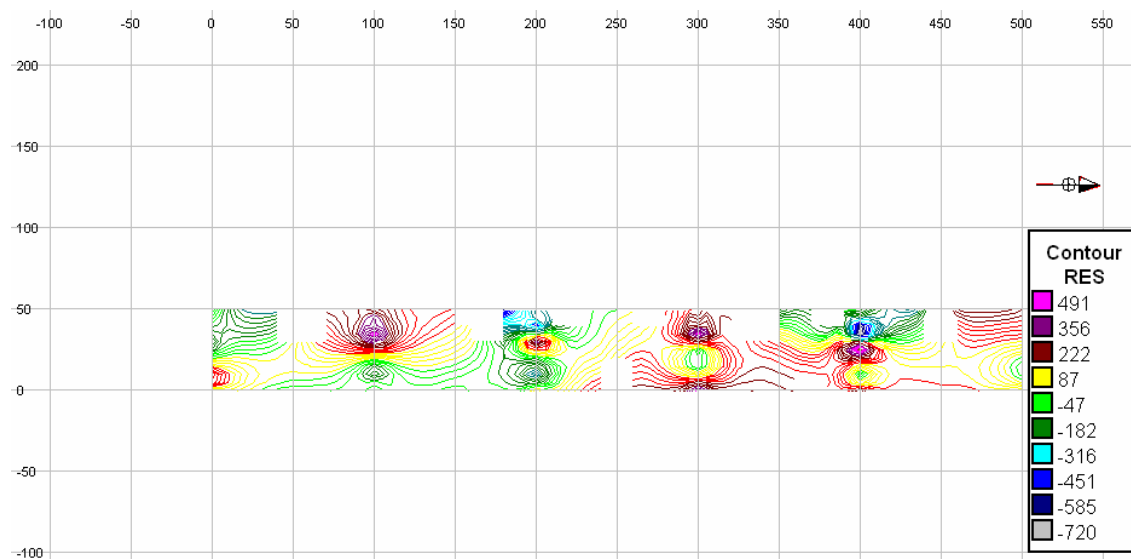
برای از بین بردن نامتقارنی بی‌هنجاری مغناطیسی و مشخص کردن موقعیت و جهت‌گیری دقیقتر بی‌هنجاری‌ها، فیلتر برگردان به قطب را بر روی داده مغناطیس کل اعمال کرده‌ایم که در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است و از این پس تمامی فیلترها بر روی نقشه برگردان به قطب، اعمال خواهد شد تا پاسخ دقیقتری به دست آوریم.



شکل ۴-۱۵: نقشه برگردان به قطب داده‌های مغناطیس کل



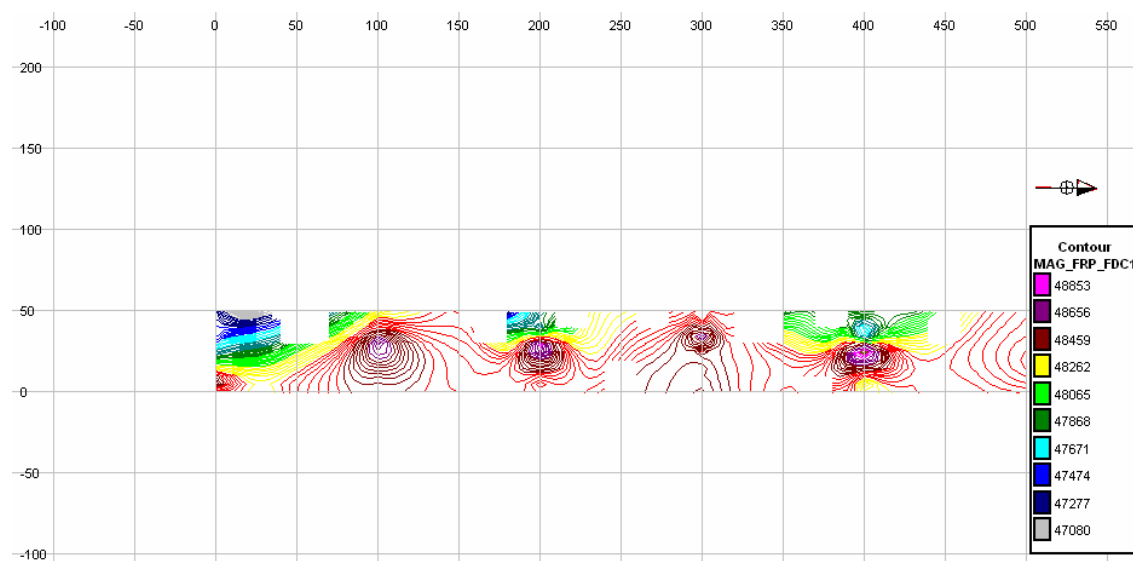
شکل ۴-۱۶: نقشه مغناطیس ناحیه‌ای منطقه



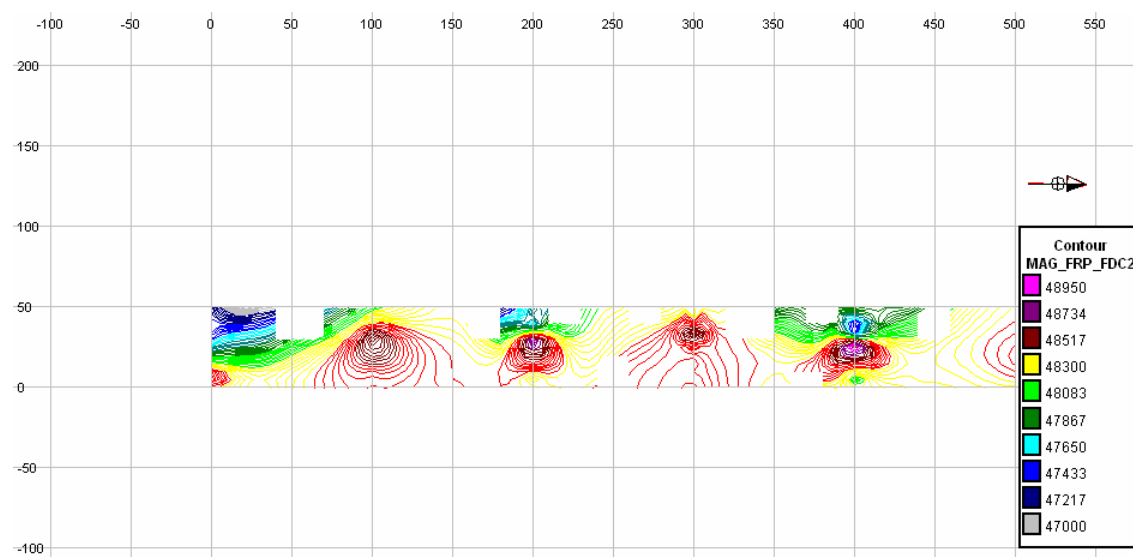
شکل ۴-۱۷: نقشه مغناطیس باقیمانده برگردان به قطب

فیلتر گسترش رو به پایین برای پیدا کردن عمق تقریبی بی‌هنجاری‌ها است، به همین منظور این فیلتر را در عمق‌های مختلف بر روی داده‌های برگردان به قطب مغناطیس کل اعمال می‌کنیم. با اعمال این فیلتر که برای عمق‌های مختلف انجام می‌شود، با نزدیک شدن به زون بی‌هنجار، بی‌هنجاری بزرگتر می‌شود و با عبور و دور شدن از بی‌هنجاری، آن بی‌هنجاری حذف خواهد شد.

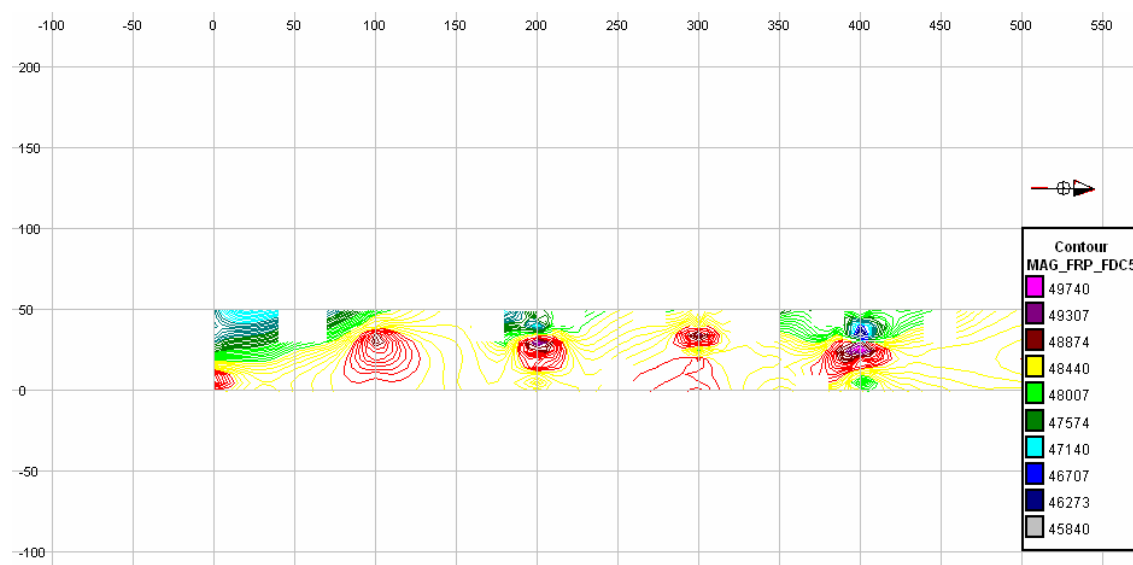
فیلتر گسترش روبه پایین را با عمق‌های ۱، ۲، ۵ و ۱۰ متر بر روی داده‌ها اعمال کرده‌ایم و همان‌طور که در شکل‌های ۴-۱۸، ۴-۱۹، ۴-۲۰ و ۴-۲۱ مشاهده می‌شود، تغییراتی حاصل شده است.



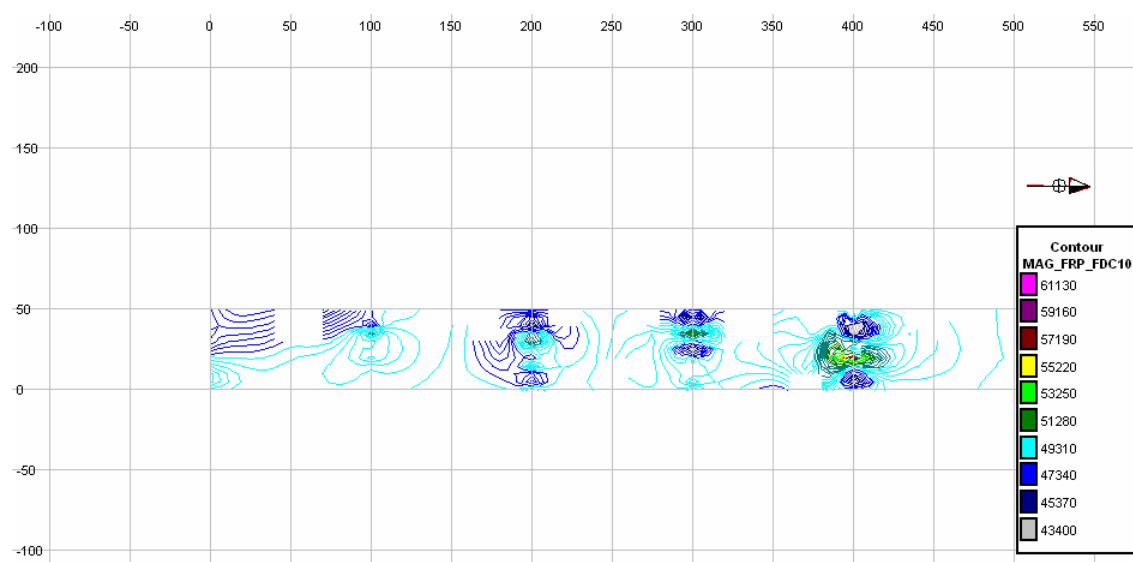
شکل ۴-۱۸: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۱ متر



شکل ۴-۱۹: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۲ متر

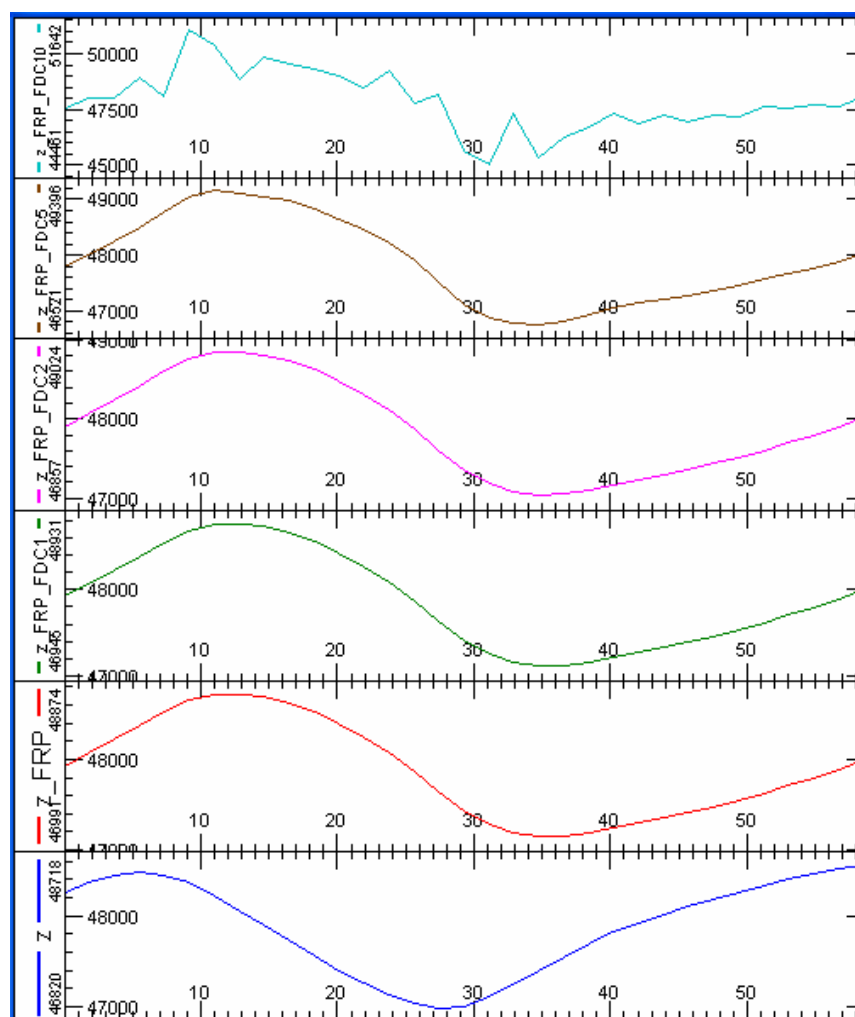


شکل ۴-۲۰: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۵ متر



شکل ۴-۲۱: نقشه گسترش رو به پایین با عمق ۱۰ متر

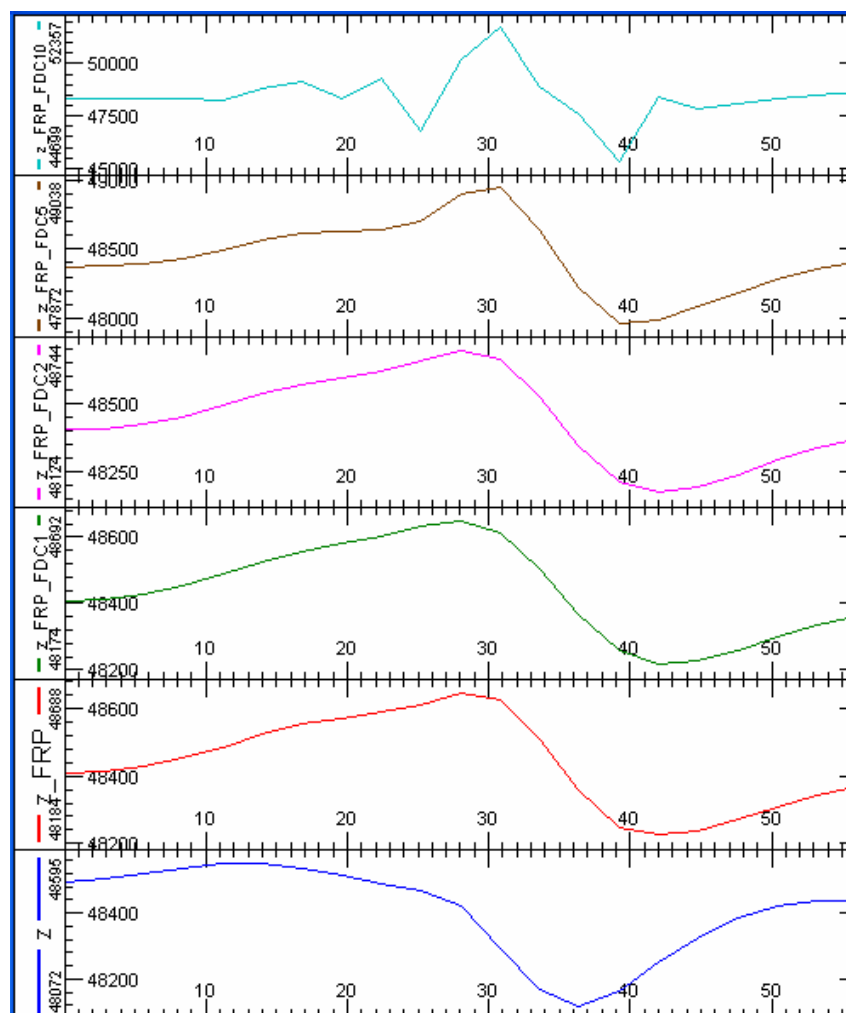
به منظور بررسی روند تغییرات مغناطیس در طول پروفیل‌ها، نمودار تک‌تک پروفیل‌های مغناطیس و برای مقایسه، پروفیل‌های مغناطیس کل، برگردان به قطب مغناطیس کل و فیلترهای گسترش رو به پایین در اعماق مختلف برای هر یک از پروفیل‌ها در شکل‌های ۴-۲۲، ۴-۲۳، ۴-۲۴، ۴-۲۵، ۴-۲۶ و ۴-۲۷ آورده‌ایم.



شکل ۴-۲۲: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش

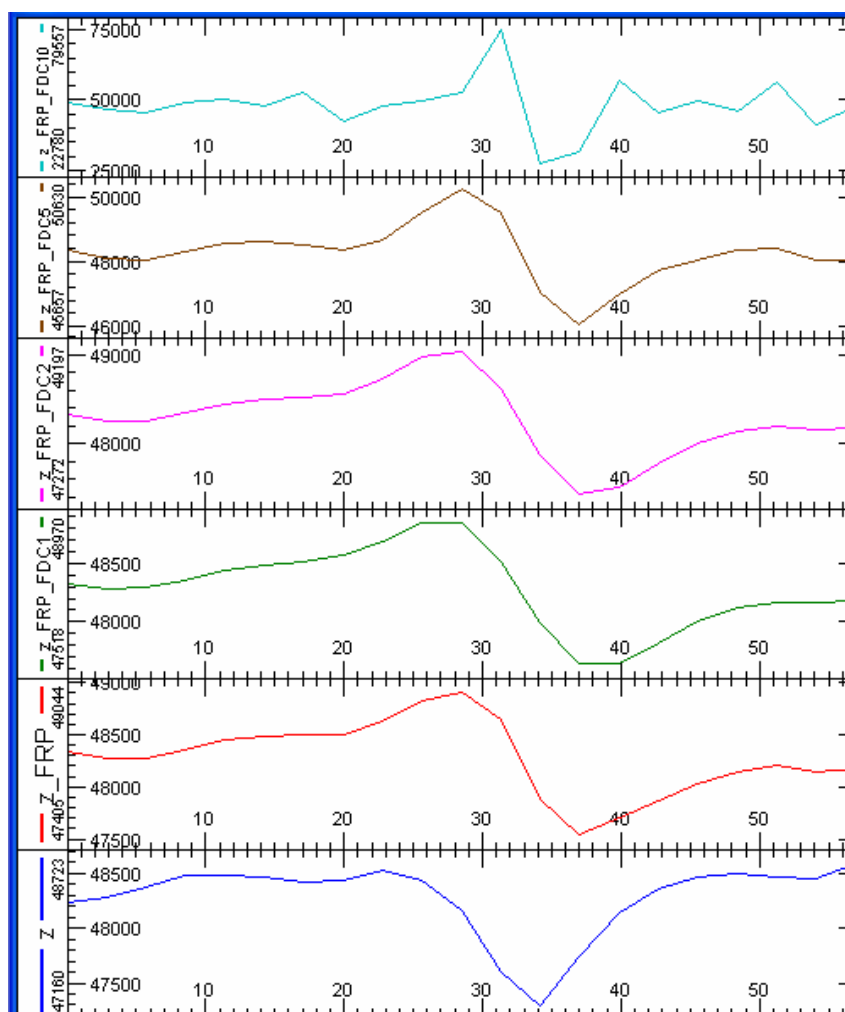
روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل صفر

در پروفیل صفر لوله گاز با شدت مغناطیسی ۴۵۵۳۳ نانوتسلا در ۳۳ متری و کابل مخابرات با شدت مغناطیسی ۴۴۷۸۵ نانوتسلا در ۳۵ متری واقع شده است.



شکل ۴-۲۳ از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۱

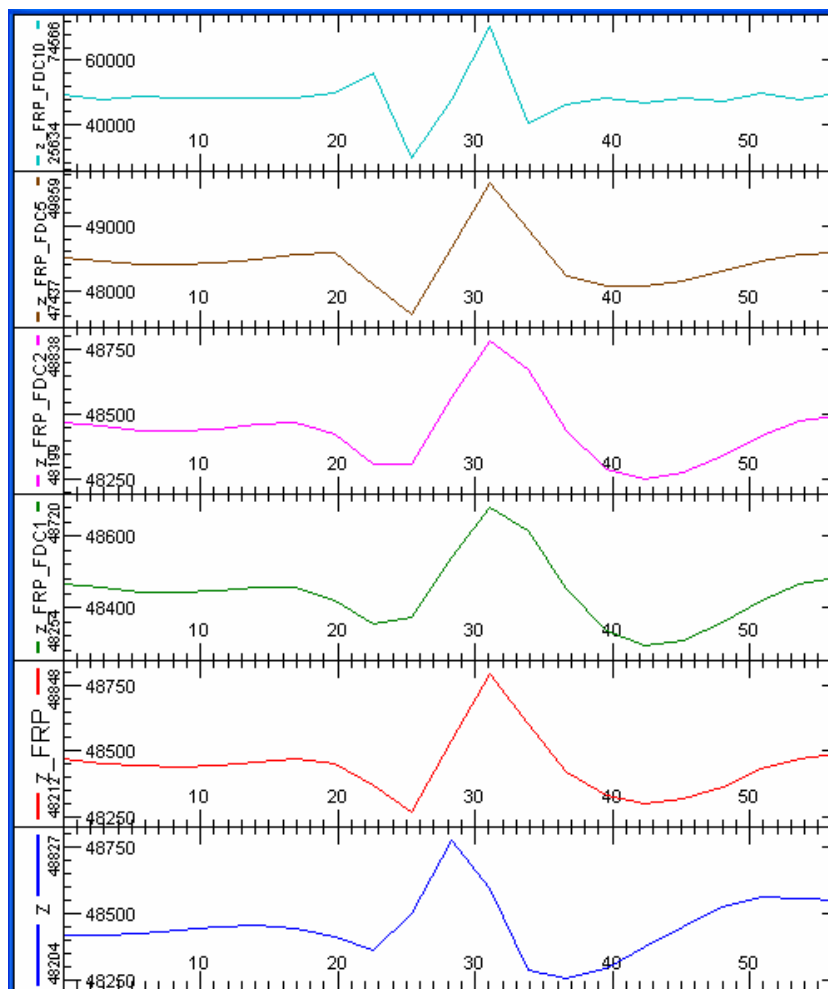
در پروفیل ۱ لوله گاز با شدت مغناطیسی ۴۹۰۳۲ نانوتسلا در ۳۴ متری و کابل مخابرات با شدت مغناطیسی ۴۸۲۳۳ نانوتسلا در ۳۶/۵ متری واقع شده است.



شکل ۴-۲۴ از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش

روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۲

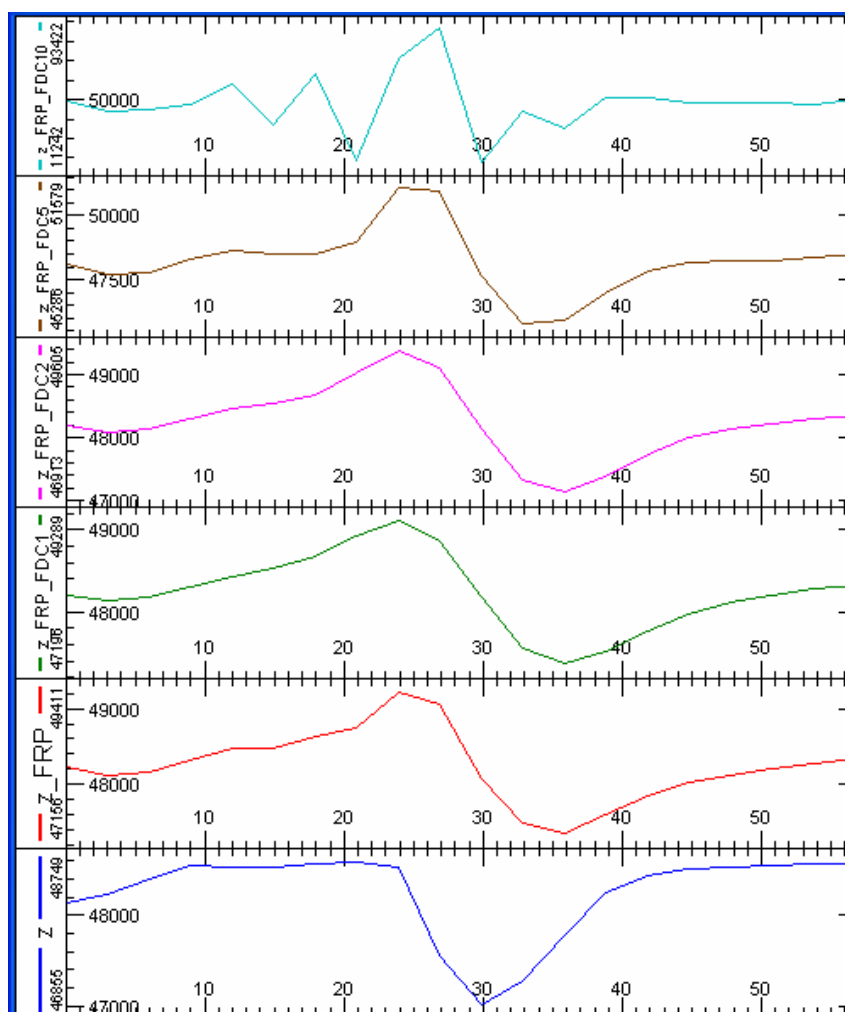
در پروفیل ۲ لوله گاز با شدت مغناطیسی ۴۶۲۴۲ نانوتسلا در ۳۴ متری و کابل مخابرات با شدت مغناطیسی ۴۶۳۴۶ نانوتسلا در ۳۶/۵ متری واقع شده است.



شکل ۴-۲۵ از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش

روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۳

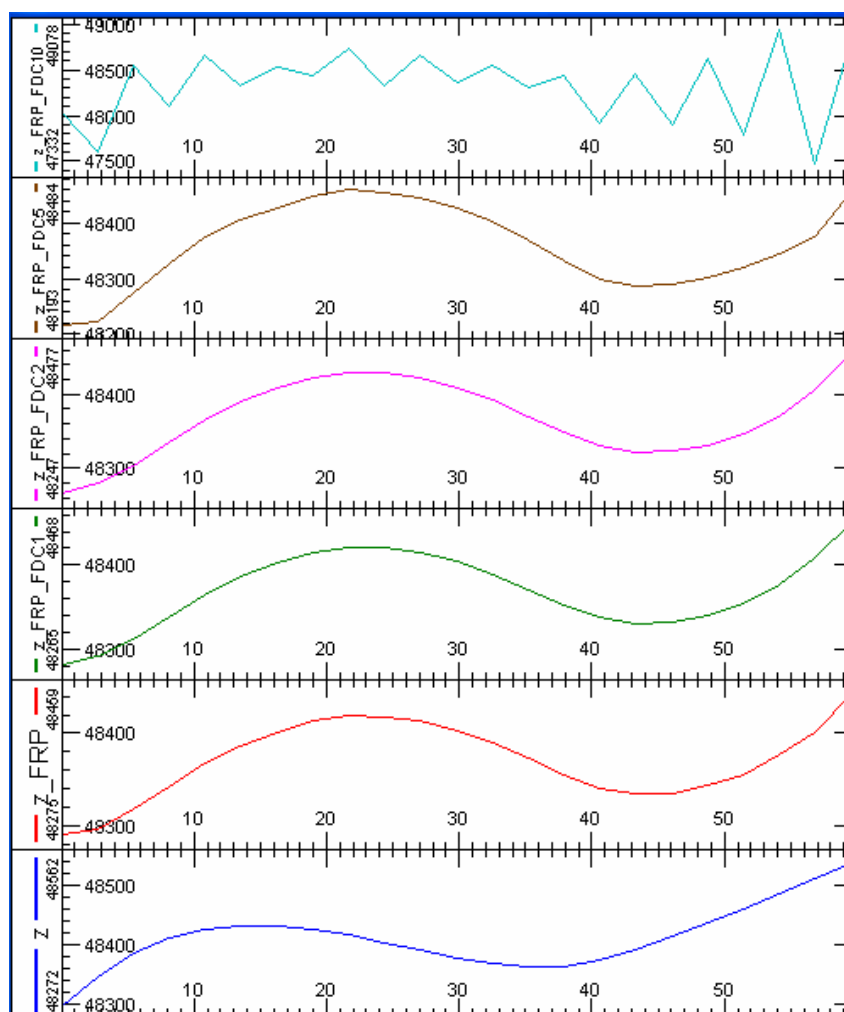
در پروفیل ۳ لوله گاز با شدت مغناطیسی ۴۹۴۰۸ نانوتسلا در ۳۳ متری و کابل مخابرات با شدت مغناطیسی ۴۸۲۵۹ نانوتسلا در ۳۵/۵ متری واقع شده است.



شکل ۴-۲۶: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش

روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۴

در پروفیل ۴ لوله گاز با شدت مغناطیسی ۴۵۲۶۶ نانوتسلا در ۳۳ متری و کابل مخابرات با شدت مغناطیسی ۴۷۰۱۱ نانوتسلا در ۳۶ متری واقع شده است.



شکل ۴-۲۷: از پایین به بالا نمودار مغناطیس کل (Z)، برگردان به قطب مغناطیس کل (Z_FRP) و فیلترهای گسترش

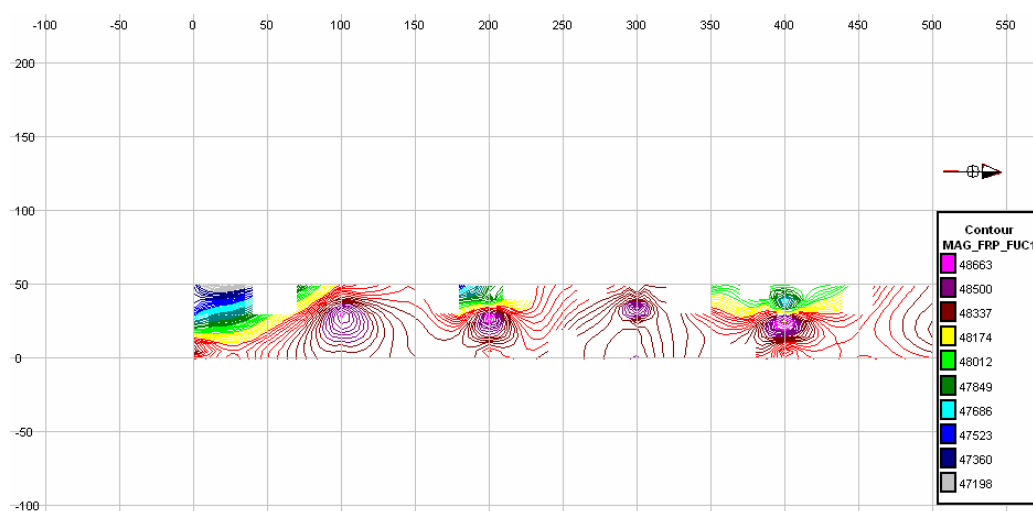
روبه پایین (۱متر، ۲متر، ۵متر و ۱۰متر) برای پروفیل ۵

در پروفیل ۵ لوله گاز با شدت مغناطیسی ۴۹۱۳۵ نانوتسلا در ۳۴ متری و کابل مخابرات با شدت مغناطیسی ۴۸۰۲۵ نانوتسلا در ۳۷/۵ متری واقع شده است.

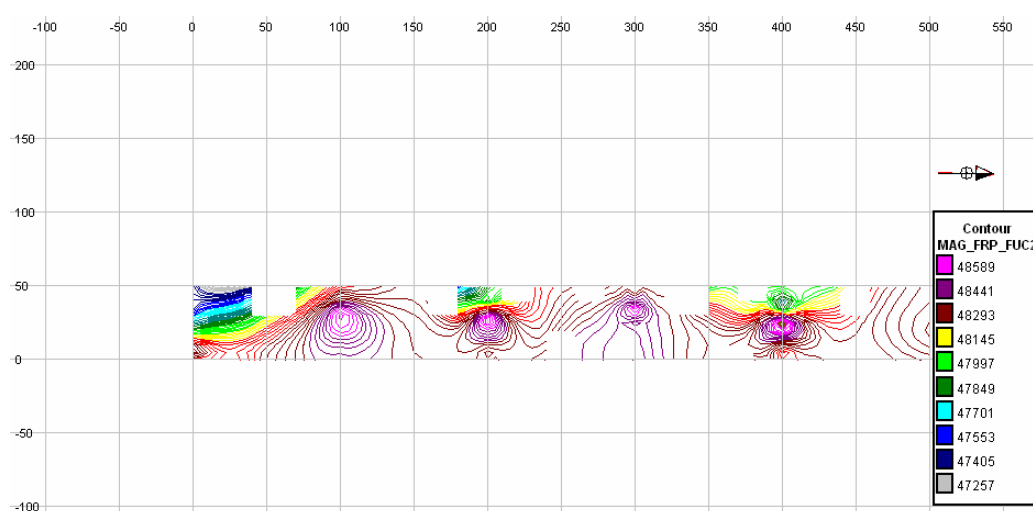
یکی دیگر از پردازش‌هایی که بر روی داده‌های مغناطیس‌سنجی اعمال می‌شود، فیلتر گسترش روبه بالا است. خاصیت این پردازش حذف بی‌هنجاری‌های سطحی و نمایان کردن بی‌هنجاری‌های واقع در اعماق بیشتر است. با علم بر اینکه اهداف مورد نظر در این منطقه در عمق کم واقع شده‌اند و هدف از

اعمال فیلتر بر روی داده‌های برداشت شده نمایان کردن بی‌هنجاری‌های سطحی است، بنابر این با اعمال فیلتر گسترش روبه بالا بر روی داده‌ها نتایج مناسبی حاصل نمی‌شود.

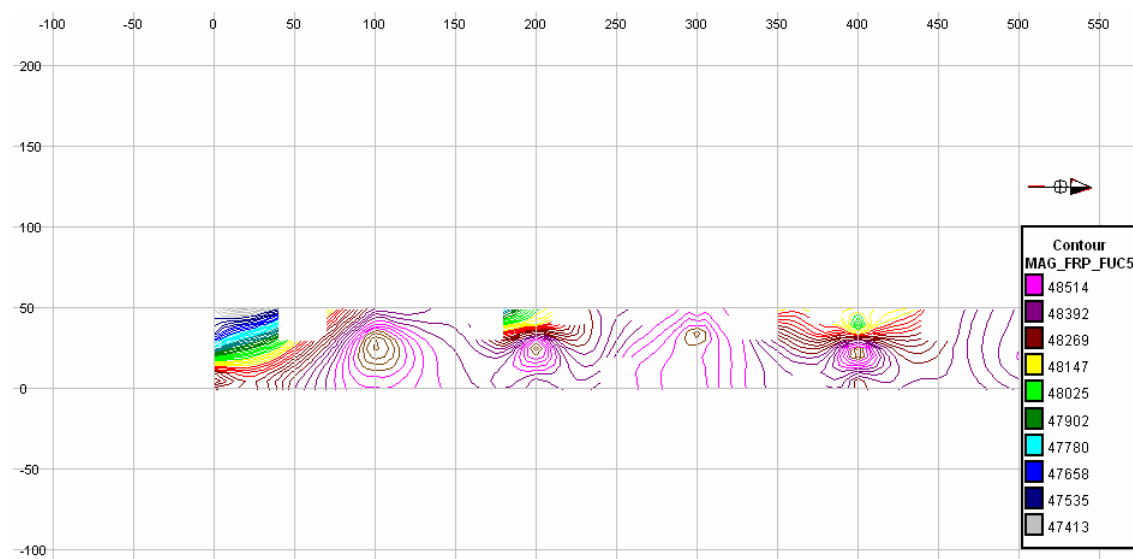
مشاهده شکل‌های پربندی داده‌ها با اعمال فیلتر گسترش روبه بالا نشان می‌دهد که با اعمال این فیلتر بر روی داده‌ها به ترتیب از ۱ متر تا ۱۰ متر پربندها به ترتیب صاف‌تر شده و به تدریج اثری از بی‌هنجاری‌های سطحی دیده نمی‌شود.



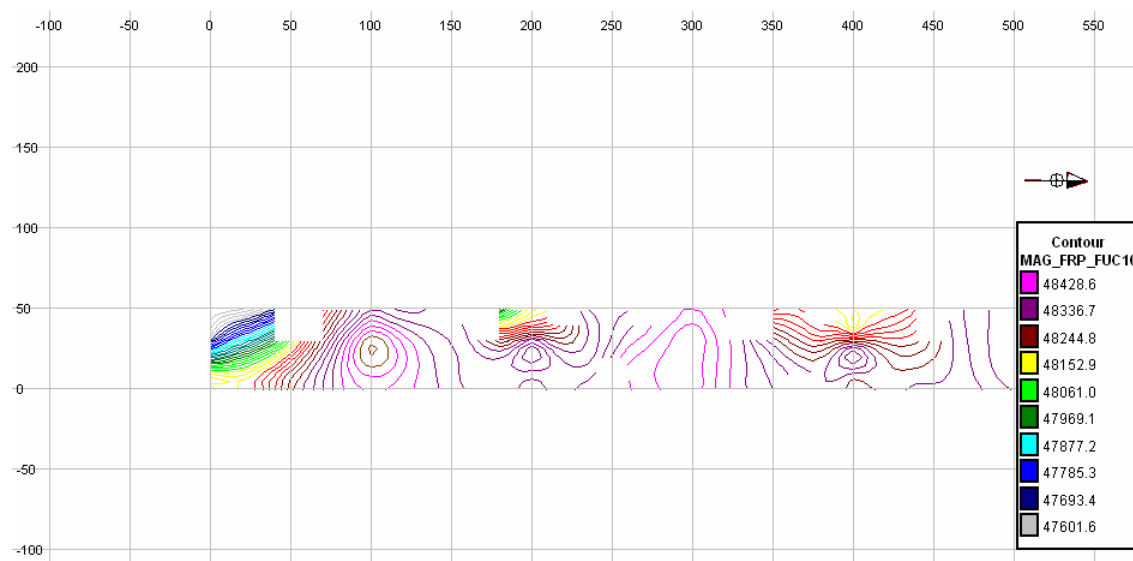
شکل ۴-۲۸: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۱ متر



شکل ۴-۲۹: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۲ متر



شکل ۴-۳۰: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۵ متر



شکل ۴-۳۱: نقشه گسترش روبه بالا ارتفاع ۱۰ متر

فصل پنجم

برداشتهای سه بعدی GPR

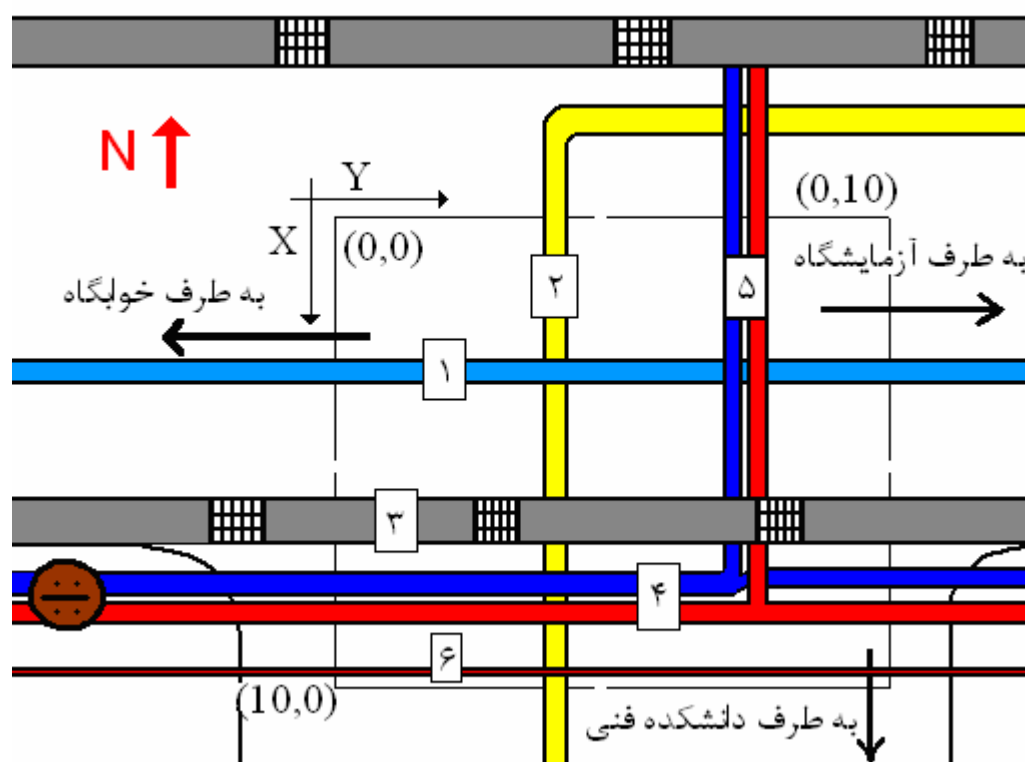
به منظور آشکارسازی و بررسی تأسیسات زیرسطحی در داخل دانشگاه صنعتی شاهرود و در مقابل دانشکده فنی این دانشگاه یک شبکه برداشت با روش GPR در نظر گرفته شده است. این شبکه از ۱۱ پروفیل طولی و ۱۱ پروفیل عرضی به فواصل ۱ متر از هم تشکیل یافته است. به این ترتیب ابعاد شبکه برابر ۱۰ متر طول و ۱۰ متر عرض می‌باشد. شکل ۵-۱ تصویر هوایی منطقه برداشت و محدوده شبکه برداشت را نمایش می‌دهد.



شکل ۵-۱: تصویر هوایی از منطقه و محدوده شبکه برداشت شده در داخل دانشگاه صنعتی شاهرود مقابل دانشکده فنی

مهندسی [www.Googleearth.com]

این شبکه به همراه موقعیت ساختارهای مورد بررسی در شکل ۲-۵ آورده شده است. پروفیل‌های شمالی-جنوبی از X0 تا X10 و پروفیل‌های غربی-شرقی از Y0 تا Y10 نامگذاری شده‌اند. به منظور بررسی جزئیات بیشتر در طول پروفیل‌های برداشتی در این شبکه، ابتدا پروفیل‌ها به صورت دو بعدی بررسی خواهند شد. همچنین در خاتمه این فصل تفسیر سه‌بعدی از شبکه برداشت مذکور ارائه خواهد شد.



شکل ۲-۵: موقعیت ساختارهای زیرسطحی شبکه برداشت شده در داخل دانشگاه صنعتی شاهرود مقابل دانشکده فنی مهندسی.

معرفی ساختارهای زیر سطحی شبکه به ترتیب شماره آنها در شکل ۲-۵:

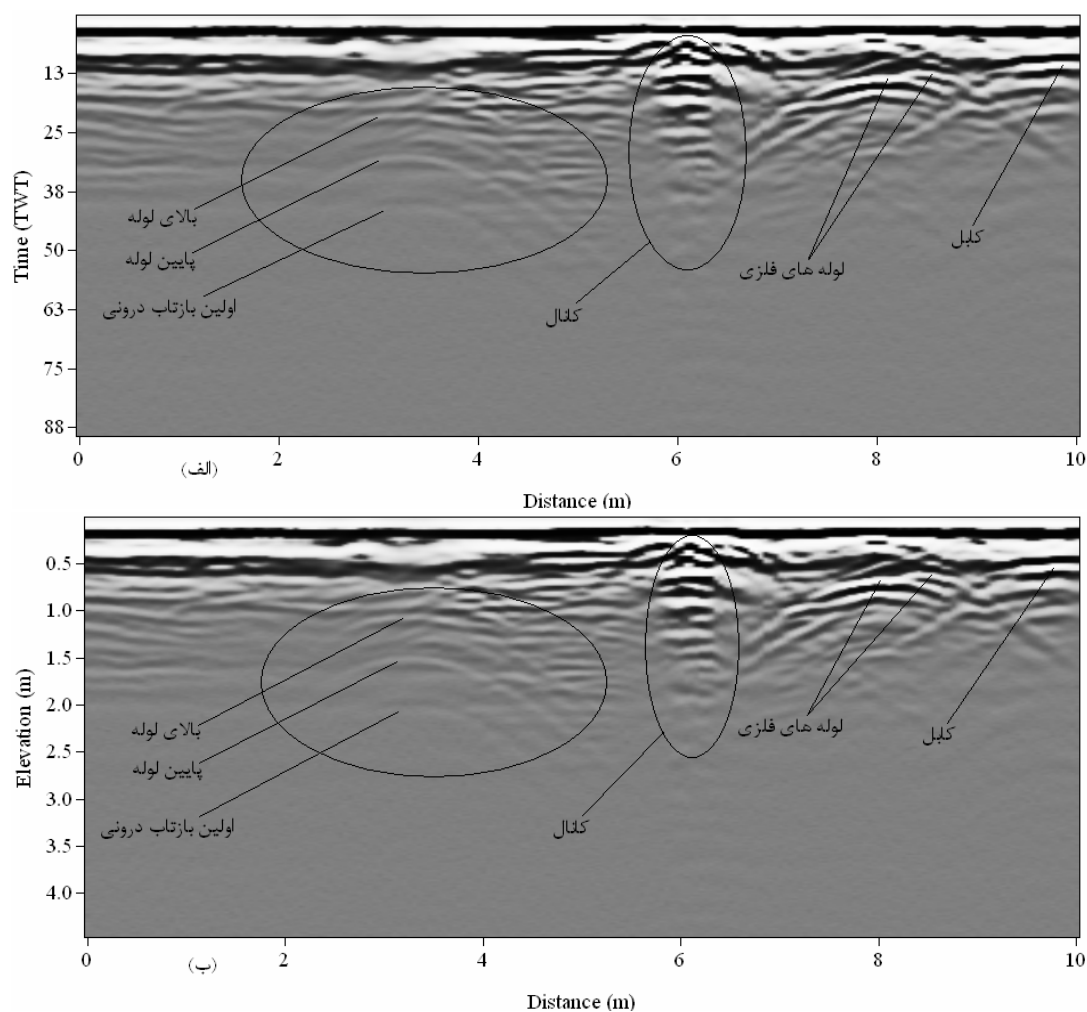
- | | |
|-------------------|--------------------------------|
| ۱- لوله آب | ۴- لوله‌های شوفاژ |
| ۲- لوله گاز | ۵- لوله‌های شوفاژ انشعاب یافته |
| ۳- کانال (آبراهه) | ۶- کابل |

۵-۱- پروفیل‌های X برداشت شده در جهت شمالی-جنوبی شبکه

برداشت داده‌ها در امتداد پروفیل‌های X شبکه، در ۱۱ پروفیل ۱۰ متری بصورت موازی و با فاصله ۱ متر از یکدیگر انجام گرفته است. این پروفیل‌ها موازی با محور X شبکه می‌باشند و نامگذاری آنها در جهت افزایش محور Y صورت گرفته است.

۵-۱-۱- پروفیل X0

مقطع زمانی پروفیل X0 را در شکل ۵-۳ با اعمال فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک به نمایش در آمده است.



شکل ۵-۳: مقطع زمانی (الف) و مقطع عمقی (ب) پروفیل X0 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در این پروفیل بی‌هنجاری‌هایی قابل تشخیص است. اولین بی‌هنجاری در فاصله ۳/۳ متری پروفیل واقع شده است. این بی‌هنجاری با بیضی بزرگ در شکل مشخص شده است. در این منطقه سه بازتاب متوالی به شکل هذلولی‌های پراش با فواصل زمانی ۹ نانوثانیه دیده می‌شود. این بی‌هنجاری منطبق بر لوله آب آشامیدنی است که از جنس آریست بوده و در عمق ۱/۱ متری از سطح زمین مدفون است. اختلاف بالا در گذردهی خاک و آب شیرین و نیز کم اتلاف بودن آب شیرین نسبت به امواج GPR، چنین بازتاب‌هایی را سبب شده است. هذلولی اول پاسخ ناشی از قسمت فوقانی لوله و هذلولی دوم پاسخ ناشی از قسمت پایینی لوله است. هذلولی سوم که در مقطع شکل ۳-۵ به زحمت قابل تشخیص است، اولین بازتاب درونی (چندگانه^۱) لوله می‌باشد. علت وجود چنین فاصله‌ای در بین این پاسخ‌ها، سرعت بسیار پایین امواج GPR در آب آشامیدنی است. فاصله این هذلولی‌ها در حدود ۹ نانوثانیه می‌باشد. با توجه به سرعت امواج GPR در آب که برابر ۰/۰۳۳ متربرنانوثانیه است و با استفاده از فرمول سرعت ($V = \frac{D}{t/2}$) قطر لوله را در حدود ۱۴/۸ سانتیمتر تخمین می‌زنیم. لوله مورد نظر دارای قطر ۶ اینچی است. نتیجه بدست آمده از مقطع GPR دارای تطابق خوبی با قطر واقعی لوله می‌باشد. بی‌هنجاری دوم که در فاصله ۶/۱ متری پروفیل مشاهده می‌شود، ناشی از حضور کانال (آبراهه) در این ناحیه است. در اینجا شاهد بازتاب‌های مکرری هستیم که تقریباً از سطح آغاز شده و تا عمق زمین امتداد می‌یابند. بازآوایش^۲ امواج در فضای خالی کانال و همچنین فلزات موجود در ساختار بتون مورد استفاده در سقف این کانال می‌توانند این بازتاب‌ها را سبب شده باشند. از آنجا که فلزات موجود در بتون سقف این کانال، نزدیک به سطح هستند، می‌توانند نقش برجسته‌تری در تولید این بازتاب‌ها داشته باشند.

هذلولی‌های پراش مشخص شده در فاصله ۸ متری پروفیل در شکل ۵-۲، بازتاب از سطح دو لوله فولادی مربوط به آب سرد و گرم شوفاژ می‌باشد. هر چند که فاصله این دو لوله تقریباً ۱۰ سانتیمتر

تخمین می‌زنیم. لوله مورد نظر دارای قطر ۶ اینچی است. نتیجه بدست آمده از مقطع GPR دارای تطابق خوبی با قطر واقعی لوله می‌باشد. بی‌هنجاری دوم که در فاصله ۶/۱ متری پروفیل مشاهده می‌شود، ناشی از حضور کانال (آبراهه) در این ناحیه است. در اینجا شاهد بازتاب‌های مکرری هستیم که تقریباً از سطح آغاز شده و تا عمق زمین امتداد می‌یابند. بازآوایش^۲ امواج در فضای خالی کانال و همچنین فلزات موجود در ساختار بتون مورد استفاده در سقف این کانال می‌توانند این بازتاب‌ها را سبب شده باشند. از آنجا که فلزات موجود در بتون سقف این کانال، نزدیک به سطح هستند، می‌توانند نقش برجسته‌تری در تولید این بازتاب‌ها داشته باشند.

هذلولی‌های پراش مشخص شده در فاصله ۸ متری پروفیل در شکل ۵-۲، بازتاب از سطح دو لوله فولادی مربوط به آب سرد و گرم شوفاژ می‌باشد. هر چند که فاصله این دو لوله تقریباً ۱۰ سانتیمتر

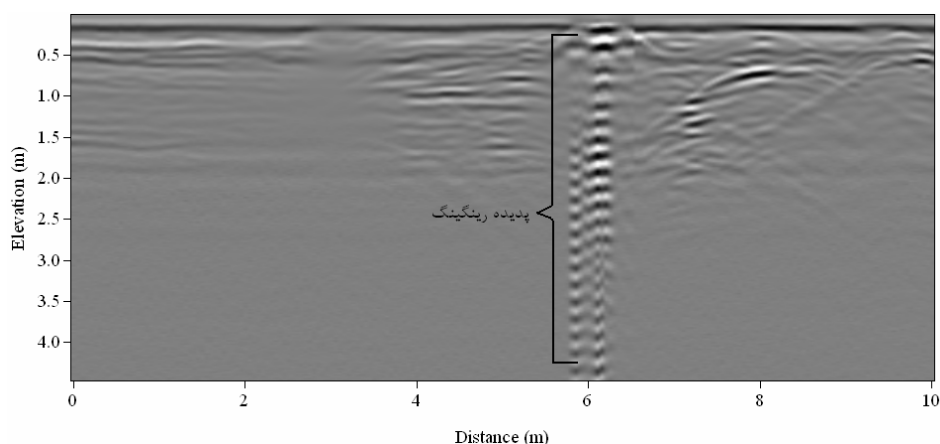
¹ Multiple

² Reverberation

است و پاسخ آنها دارای همپوشانی است ولی پاسخ آنها به خوبی قابل تفکیک است. این پاسخ‌ها در عمق ۰/۷ متری پروفیل قابل تشخیص می‌باشند. در فاصله ۹/۸ متری پروفیل یک بی‌هنجاری مشاهده می‌شود. این بازتاب اولین بازتاب از کابلی است، که در عمق ۰/۵ متری سطح زمین واقع شده است. در عمق ۱ متری زیر کابل یک بازتاب ضعیف دیده می‌شود در نگاه اول احتمال دارد بازتاب از اهداف زیرسطحی تفسیر شود، اما این پاسخ، دومین بازتاب پس از برخورد با سطح زمین و بازتاب مجدد از کابل است. دلیل این بازتاب‌های مکرر که در فاصله برابر از یکدیگر قرار دارند، نزدیک بودن کابل به سطح زمین است.

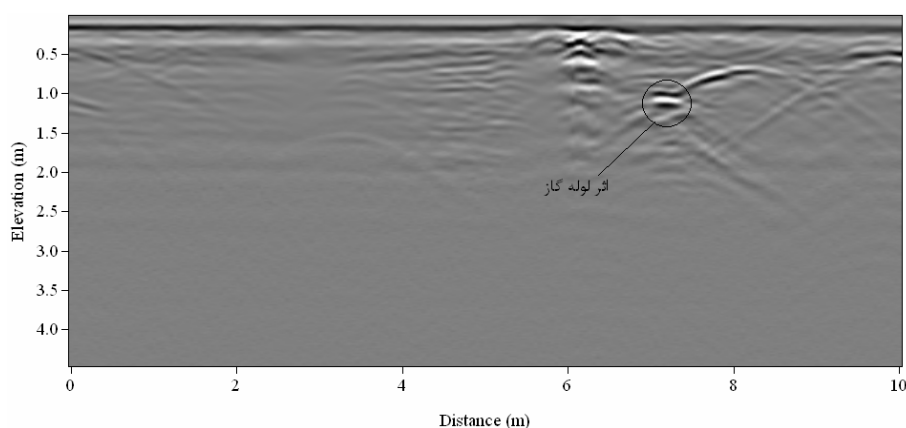
فلزات دارای گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی بسیار بالایی نسبت به مواد تشکیل دهنده پوسته زمین هستند [Zeng, McMechan, 1997]. همان‌طور که در شکل ۵-۳ مشاهده شد، لوله‌ها و کابل-های فلزی بازتاب‌های بارزتری را نسبت به لوله آذبستی نشان می‌دهند. عمق پوسته امواج GPR در فلزات بسیار پایین است. از این رو این امواج به سرعت در اهداف فلزی مستهلک می‌شوند. به همین دلیل هیچ بازتابی از قسمت تحتانی لوله‌های فلزی در مقاطع GPR دیده نمی‌شود.

مقطع عمقی پروفیل X3 در شکل ۵-۴ به نمایش درآمده است. در فاصله ۶/۲ متری این پروفیل پدیده حلقوی مشاهده می‌شود. این اثر به دلیل عبور دستگاه از روی دریچه مشبک فلزی کانال ایجاد شده است.



شکل ۵-۴: مقطع عمقی پروفیل X3 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC

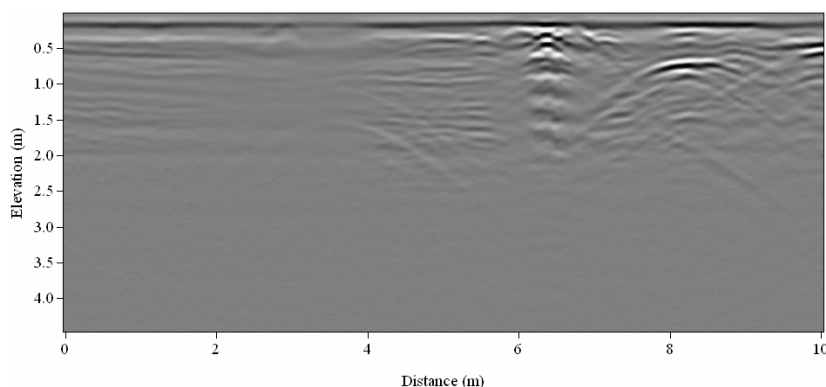
مقطع عمقی پروفیل X4 در شکل ۵-۵ به نمایش در آمده است. در این نیز بی‌هنجاریهای ناشی از لوله آب‌بستی، کانال، لوله‌های فلزی شوفاژ و کابل‌های فلزی، قابل مشاهده است. علاوه بر بی‌هنجاری‌های مذکور، یک بی‌هنجاری در فاصله ۷/۲ متری پروفیل و در عمق ۱/۱ متری پروفیل واقع شده است. این بی‌هنجاری با دایره در شکل مشخص شده است. این پاسخ احتمالاً حاصل بازتاب امواج GPR از سطح لوله گاز است. این لوله به موازات پروفیل‌های X و عمود بر پروفیل‌های Y می‌باشد. از این رو در تفسیر پروفیل‌های Y به بررسی دقیق‌تر آن می‌پردازیم.



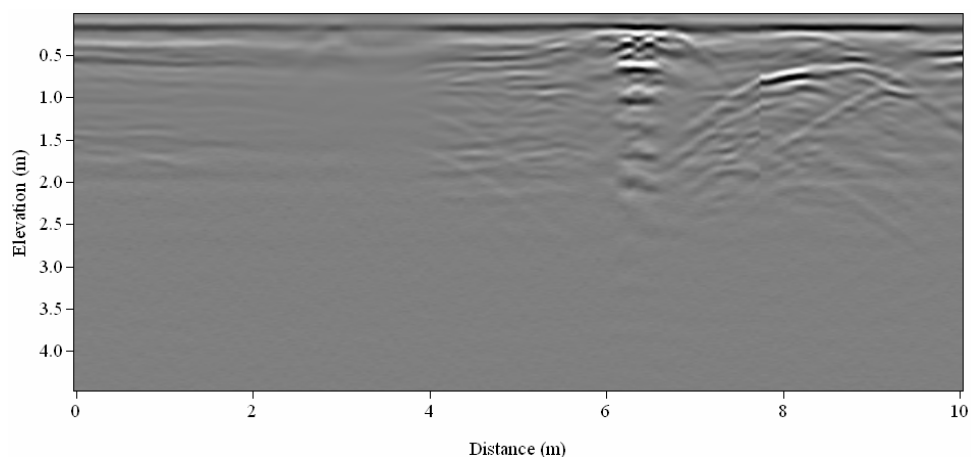
شکل ۵-۵: مقطع عمقی پروفیل X4 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC

در پروفیل‌های X1، X2، X5 و X6 تغییرات قابل توجهی علاوه بر بی‌هنجاری‌های مذکور به چشم نمی‌خورد. بنابراین به نمایش مقاطع عمقی آنها در شکل ۵-۶ اکتفا می‌شود.

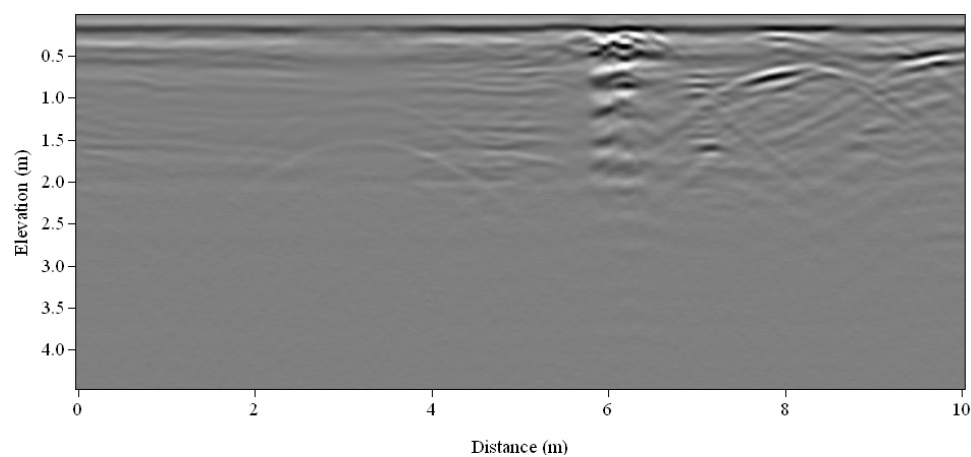
(الف)



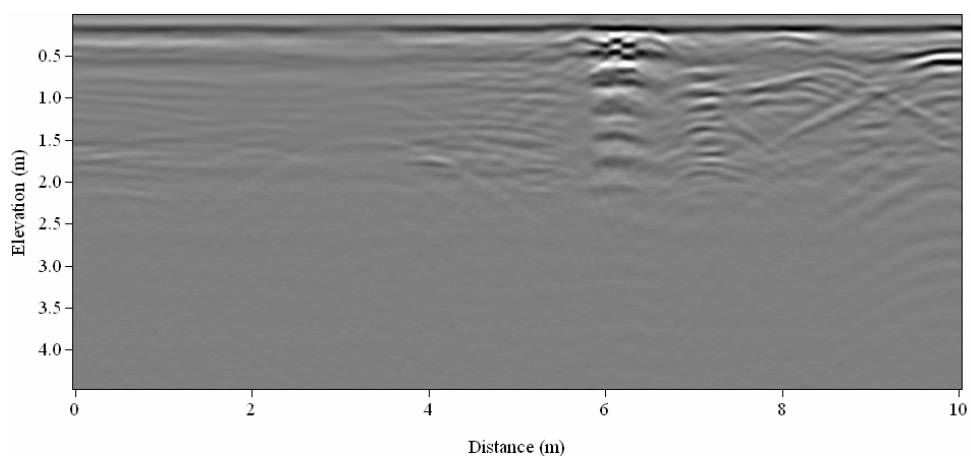
(ب)



(ج)

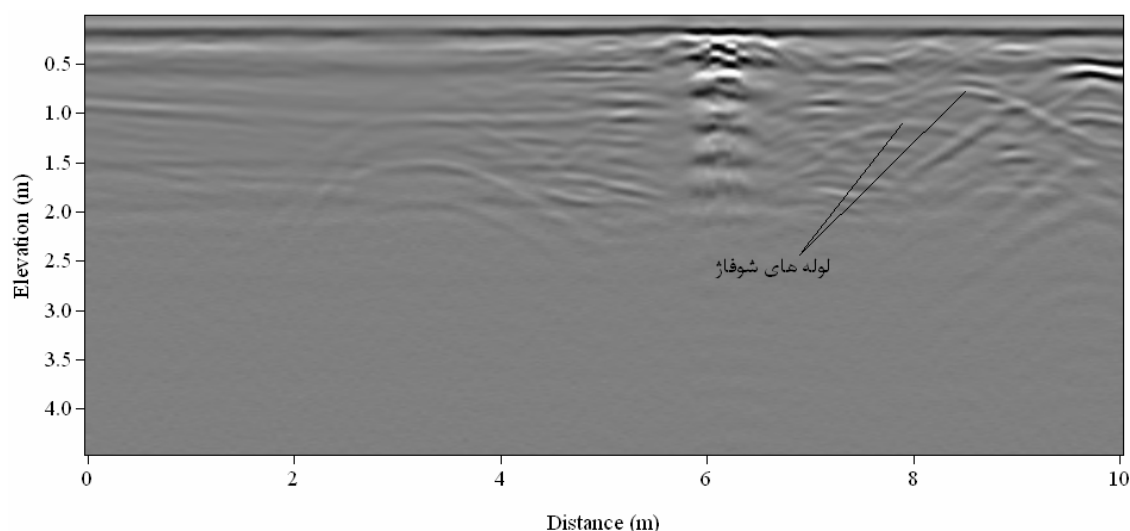


(د)



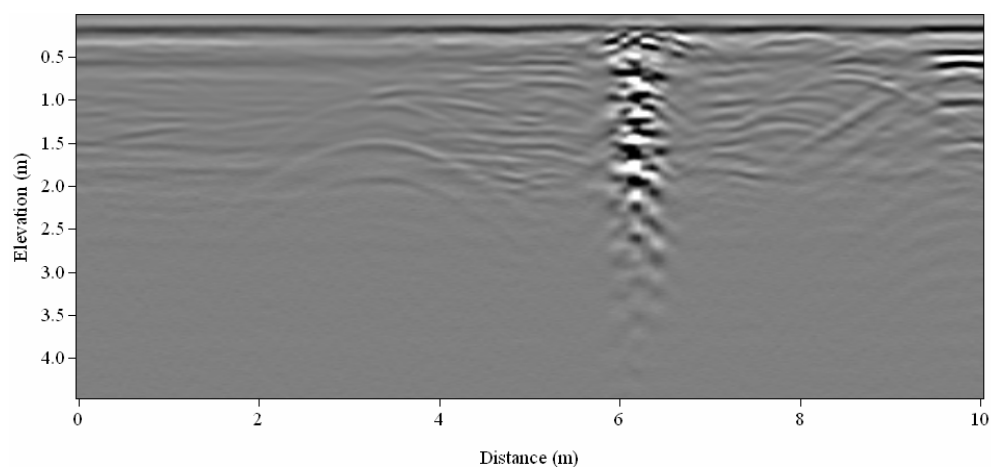
شکل ۵-۶: مقاطع عمقی پروفیل X1 (الف)، پروفیل X2 (ب)، پروفیل X5 (ج) و پروفیل X6 (د)، با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC.

مقاطع عمقی پروفیل X7 در شکل ۵-۷ و مقاطع عمقی پروفیل‌های X8 تا X10 در شکل ۵-۸ به نمایش درآمده است. در پروفیل‌های X7 به بعد، تغییری که در کل مقاطع عمقی به چشم می‌خورد، جدایش بازتاب از سطح لوله‌های فلزی شوفاژ است. در پروفیل‌های ابتدایی (X0 تا X6) پاسخ ناشی از این دو لوله بسیار نزدیک به هم و دارای همپوشانی قابل توجهی است. این پاسخ در فاصله ۸ تا ۸/۵ متری و در عمق ۰/۷ متری پروفیل‌های مزبور قابل تشخیص است. اما در پروفیل‌های انتهایی این پاسخ به صورت دو بازتاب هذلولی شکل با فاصله نسبتاً قابل توجهی، مشاهده می‌شوند. هذلولی اول در فاصله ۸ متر در عمق ۱/۱ متری و هذلولی دوم در فاصله ۸/۵ متر و در عمق ۰/۷ متری پروفیل‌ها دیده می‌شود. نتیجه حاصل با لوله فلزی که از لوله‌های شوفاژ به صورت فرعی منشعب شده، ارتباط مستقیم دارد. این لوله انشعاب یافته عمود بر پروفیل‌های Y و در امتداد پروفیل X7 واقع شده است. اتصال این لوله با لوله‌های شوفاژ باعث بیشتر شدن فاصله بین دو لوله موازی شده و نیز عمق دفن شدگی یکی از آنها را از ۰/۷ متر به ۱/۱ متر افزایش داده است. بدست آمدن این نتایج بدون حفاری محل، تأکیدی بر توانایی و قابلیت روش GPR در آشکارسازی جزئیات تأسیسات زیر سطحی است.

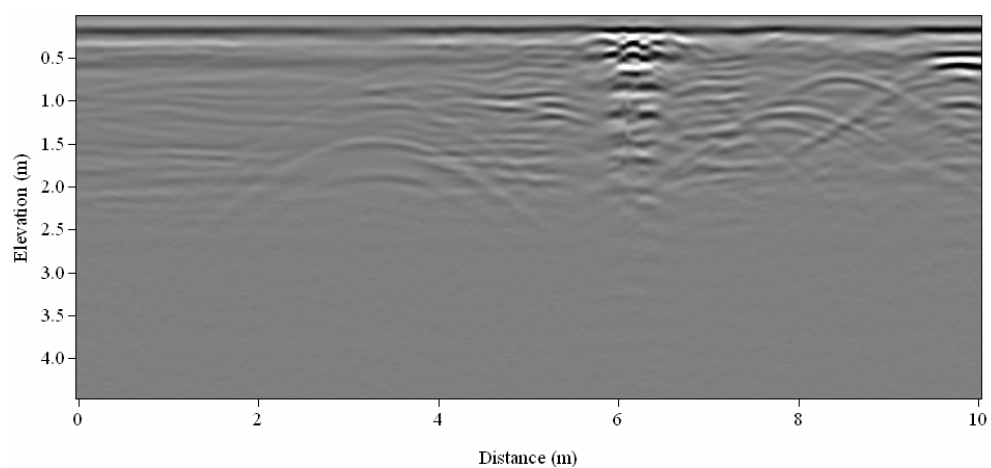


شکل ۵-۷: مقطع عمقی پروفیل X7 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC

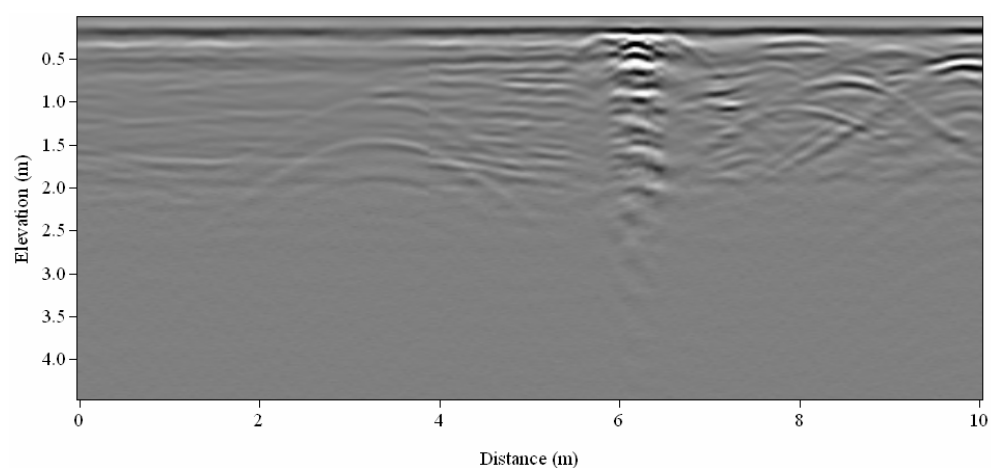
(الف)



(ب)



(ج)



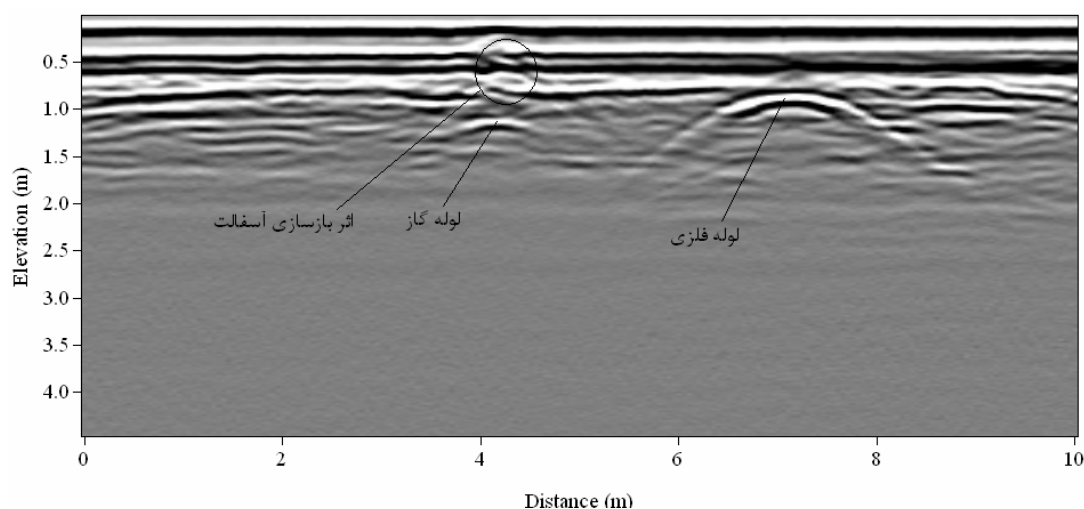
شکل ۵-۸: مقاطع عمقی پروفیل X8 (الف)، پروفیل X9 (ب) و پروفیل X10 (ج)، با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC.

۵-۲- پروفیل‌های Y برداشت شده در جهت غربی-شرقی شبکه

برداشت داده‌ها در امتداد پروفیل‌های Y شبکه، در ۱۱ پروفیل ۱۰ متری بصورت موازی با هم و با فاصله بین پروفیلی ۱ متر انجام گرفته است. این پروفیل‌ها موازی با محور Y شبکه می‌باشند و نامگذاری آنها در جهت افزایش محور X صورت گرفته است.

۵-۲-۱- پروفیل‌های Y0, Y1, Y2, Y4, Y5

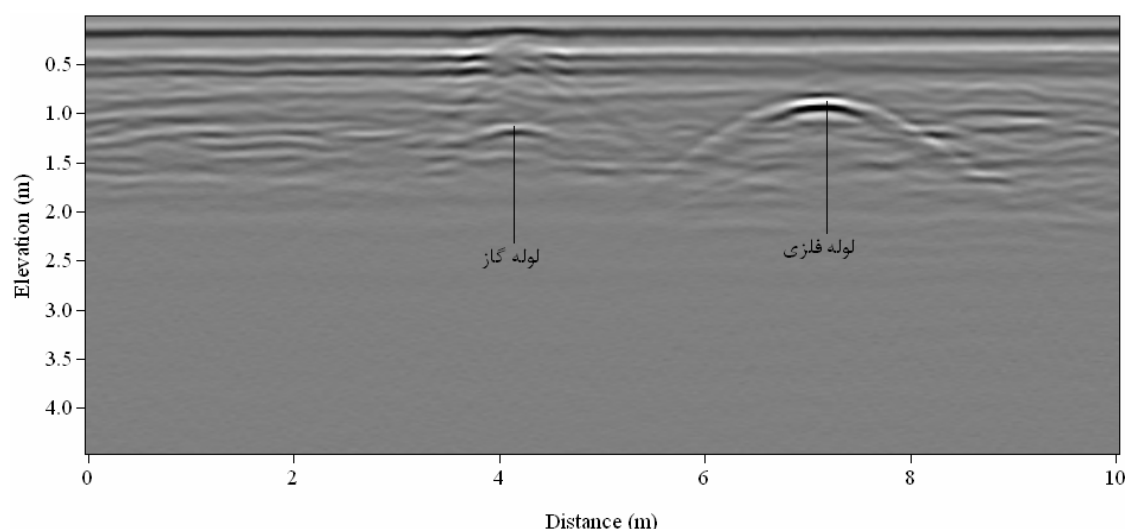
در شکل ۵-۹ مقطع عمقی پروفیل Y0 به نمایش درآمده است، همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در فاصله ۴/۲ متری و ۷/۲ متری این پروفیل بی‌هنجاری‌هایی قابل تشخیص است. در ۴/۲ متری دو پاسخ به ترتیب در عمق تقریباً ۰/۵ متری و ۱/۱ متری مشاهده می‌شود. پاسخ اول که با دایره مشخص شده است، ناشی از بازسازی آسفالت و از بین رفتن یکنواختی و همگنی خاک در این نقطه به منظور دفن کردن لوله گاز است. پاسخ دوم که در همان نقطه و در عمق ۱/۱ متری دیده می‌شود، بازتاب از سطح لوله گاز است. در فاصله ۷/۲ متری از پروفیل یک بی‌هنجاری دیگر دیده می‌شود، این هذلولی پراش وجود یک لوله فلزی در عمق ۰/۹ متری را نشان می‌دهد. این لوله (یا لوله‌های فلزی) از لوله‌های شواژ که در مقاطع پروفیل‌های X به بررسی آنها پرداخته شد، منشعب شده است.



شکل ۵-۹: مقطع عمقی پروفیل Y0 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC

لوله‌های فلزی منشعب شده به دلیل واقع شدن در مجاورت و یا روی هم احتمالاً قابل تفکیک نمی‌باشند و به صورت یک بی‌هنجاری دیده می‌شوند.

برای نمایش برجسته‌تر پاسخ ناشی از لوله‌های فلزی نسبت به بازتاب‌های ناشی از لایه‌بندی رسوبات از بهره SEC استفاده شده و مقطع حاصل در شکل ۵-۱۰ به نمایش درآمده است.



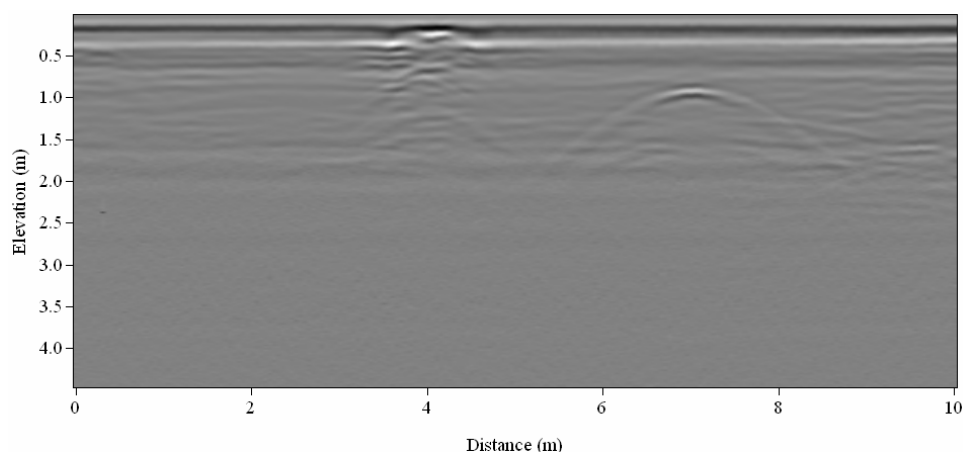
شکل ۵-۱۰: مقطع عمقی پروفیل Y0 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC

هر دو بازتاب مشاهده شده در شکل ۵-۱۰ ناشی از حضور لوله‌هایی از جنس فولاد در منطقه است. اما پاسخ لوله گاز، ضعیف‌تر از پاسخ ناشی از لوله‌های فلزی است. همچنین دنباله هذلولی پراش ناشی از لوله گاز در این مقطع قابل تشخیص نمی‌باشد. هنگام دفن کردن لوله گاز جهت محافظت لوله از خوردگی و زنگ‌زدگی یک لایه قیر دور آن می‌پیچند و لوله را در داخل گودال با خاک نرم می‌پوشانند. از آنجا که این لایه خاک نرم حاوی رس قابل توجهی است، یک محیط پراتلاف را سبب می‌شود. از این رو توان بازتاب از سطح لوله کاهش یافته و پاسخ ضعیفی در شکل دیده می‌شود. کما آنکه در برخی موارد مانند پروفیل‌هایی که در ادامه خواهند آمد، حتی پاسخی مشاهده نمی‌شود. وجود این محیط پراتلاف در اطراف لوله، همچنین باعث قطع شدن دنباله‌های هذلولی در این ناحیه شده است.

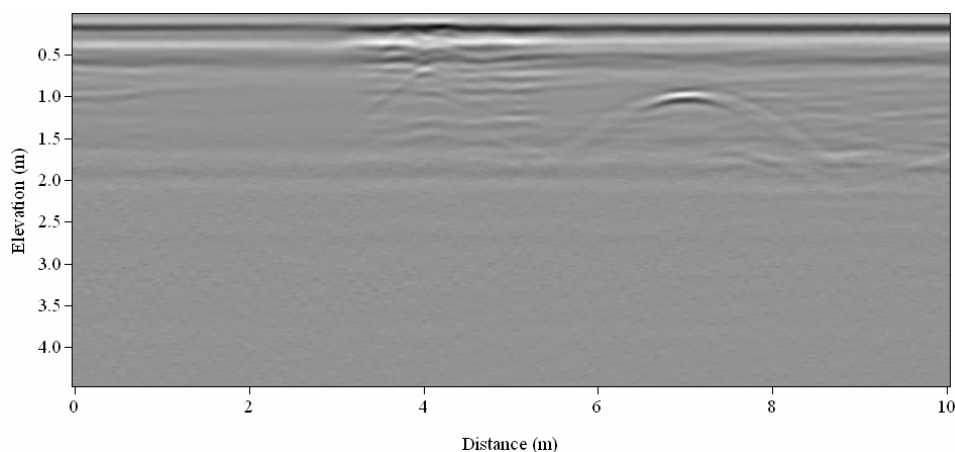
بازتابی که در فاصله ۷/۲ متری پروفیل و در عمق ۰/۹ متر دیده می‌شود، پاسخ لوله فولادی انشعاب یافته است.

واقع شدن این لوله در نزدیک سطح و همچنین عدم وجود احتمالی رسوبات پراتلاف اطراف آن، چنین بازتاب قابل توجهی را سبب شده است. پروفیل‌های Y1، Y2، Y4 و Y5 در شکل ۵-۱۱ به نمایش درآمده‌اند. همان‌طور که دیده می‌شود، بجز اثر لوله فلزی و لوله گاز بی‌هنجاری قابل توجه دیگری، قابل تشخیص نیست. در تمام این پروفیل‌ها پاسخ لوله گاز یا مشاهده نمی‌شود و یا به صورت ضعیف قابل تشخیص است. این مسأله احتمالاً ناشی از افزایش محلی، میزان رسوبات دانه ریز، در این نواحی است.

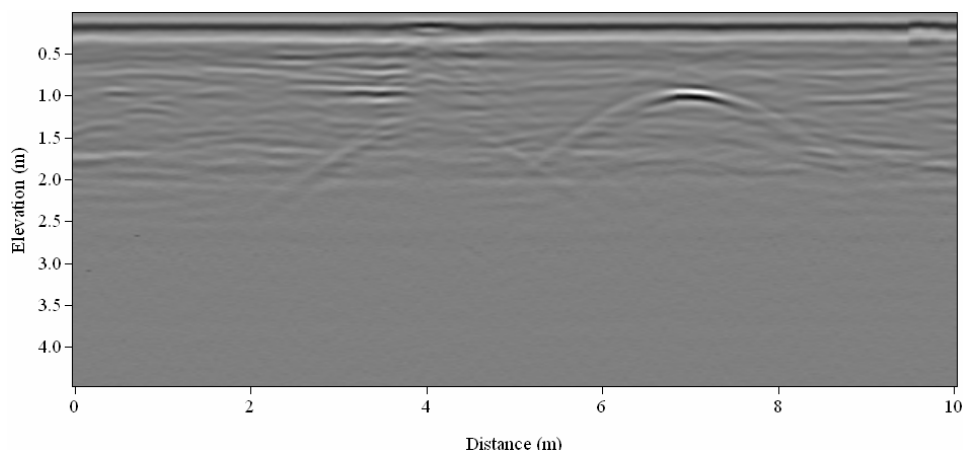
(الف)



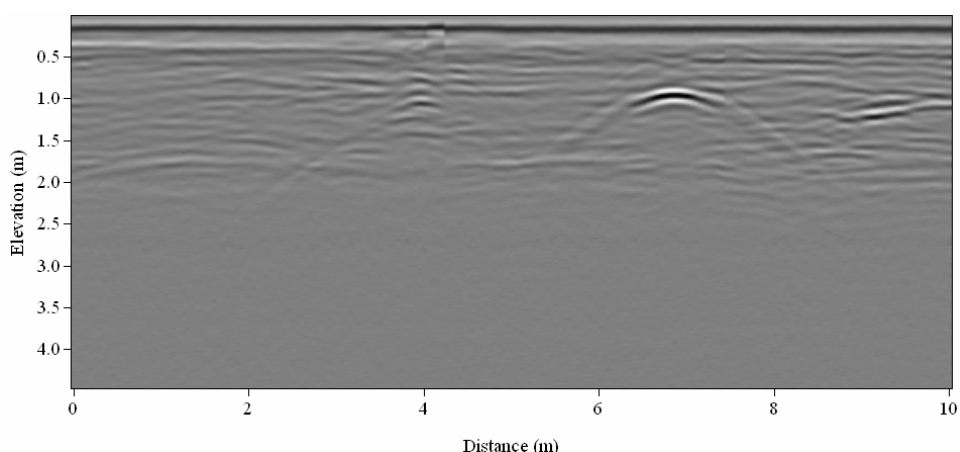
(ب)



(ج)



(د)



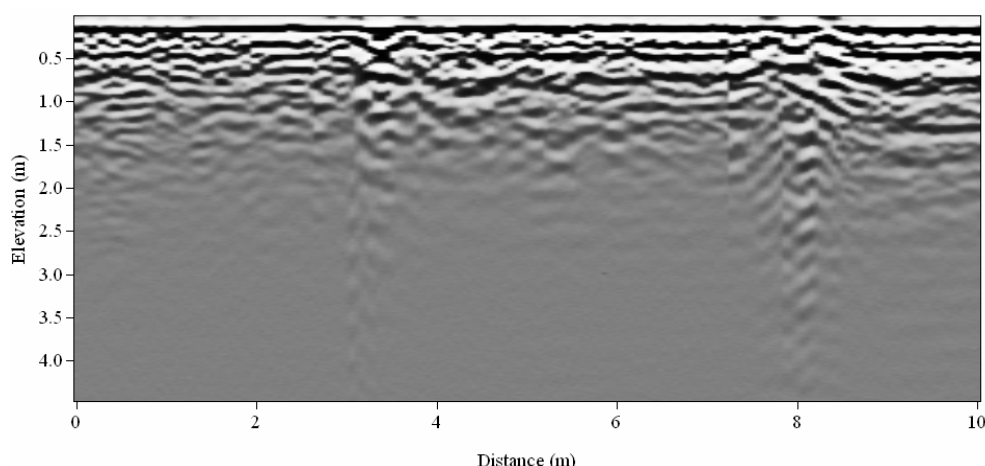
شکل ۵-۱۱: مقاطع عمقی پروفیل Y1 (الف)، پروفیل Y2 (ب)، پروفیل Y4 (ج) و پروفیل Y5 (د) با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC

۵-۲-۲- پروفیل Y6، Y7، Y9 و Y10

یک سری کانال‌های سرپوشیده (آبراهه) جهت هدایت آبهای سطحی در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود تعبیه شده است. قسمتی از کانال‌های مزبور در شبکه برداشت داده‌ها قرار گرفته و پروفیل Y6 منطبق بر این کانال می‌باشد. این کانال در عمق تقریبی ۲۰ سانتیمتری واقع شده و کف آن تقریباً در عمق ۰/۸ متری قرار دارد. همچنین عرض کانال در حدود ۰/۵ متر می‌باشد. کناره‌های کانال از سیمان و بتون ساخته شده و روی آن را با بلوک‌های بتونی که در برخی نقاط دارای دریچه‌های

مشبک فلزی است، پوشانده‌اند. دو عدد از این دریاچه‌ها در فاصله ۳/۳ و ۸ متری پروفیل Y6 واقع شده‌اند.

در شکل ۵-۱۲ مقطع عمقی پروفیل Y6 با اعمال فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک به نمایش درآمده است.



شکل ۵-۱۲: مقطع عمقی پروفیل Y6 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک

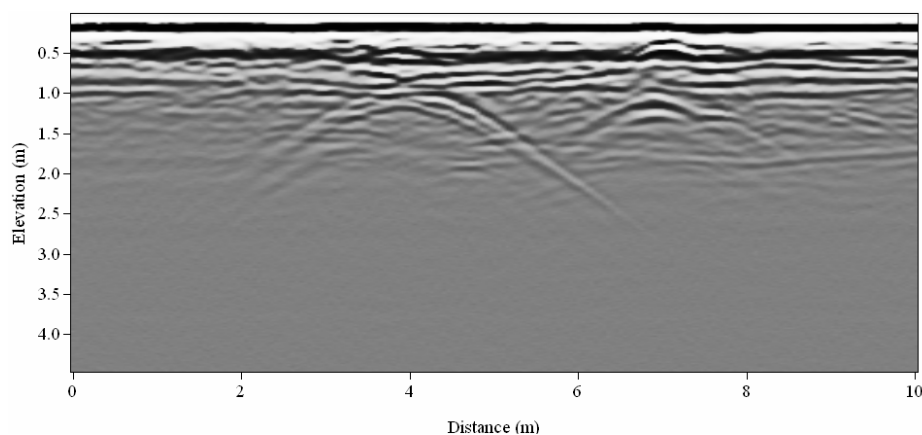
همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، یک سری بازتاب‌های بهم‌ریخته در سراسر طول پروفیل و تا عمق تقریباً ۲ متری به چشم می‌خورد. این بازتاب‌ها ناشی از بازآوایش امواج در هوای درون کانال و همچنین رینگی شدن امواج به دلیل حضور میله‌های فلزی موجود در بتون سقف کانال، می‌باشد. میله‌های فلزی نزدیک سطح به دلیل توان بازتاب بالای امواج، احتمالاً سهم بیشتری را در بوجود آوردن چنین پاسخ‌هایی دارا هستند.

دو بی‌هنجاری واقع در فاصله ۳/۳ و ۸ متری پروفیل که تا عمق ۴ متری امتداد یافته‌اند، منطبق بر دریاچه‌های مشبک فلزی کانال، می‌باشند. از آنجا که فاصله بین آنتن و این ساختارهای فلزی هوا قرار دارد، این بی‌هنجاری‌ها با شدت بیشتری نسبت به مکان‌های دیگر پروفیل به نمایش درآمده‌اند.

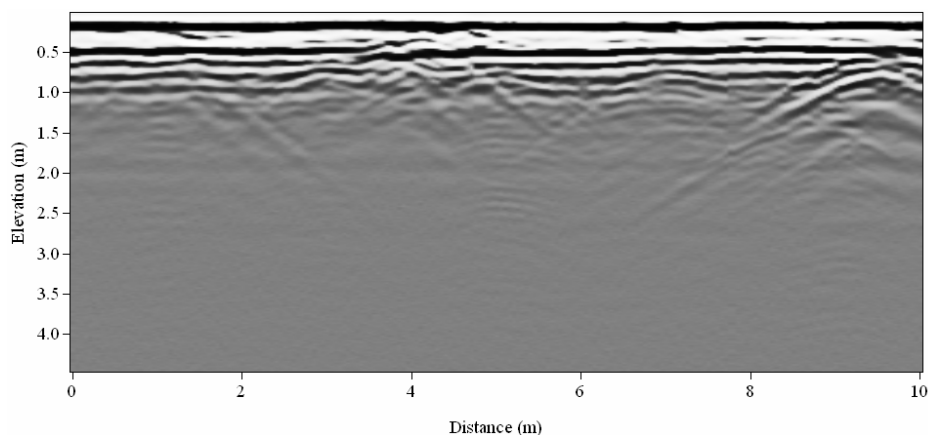
در شکل ۵-۱۳ مقاطع عمقی پروفیل‌های Y7، Y9 و Y10 به نمایش درآمده است. بر خلاف پروفیل‌های قبل، اثر لوله گاز در ۴ متری پروفیل Y7 (شکل ۵-۱۲-الف) به خوبی قابل تشخیص است. به نظر می‌رسد در این پروفیل رسوبات دانه ریز اطراف لوله، به کمترین مقدار خود رسیده‌اند. از طرفی این پروفیل نزدیک به محل انشعاب لوله‌های شوفاژ می‌باشد. این مسئله تغییر شکل هذلولی ناشی از لوله‌های منشعب شده را سبب شده است. این تغییر شکل در ۷/۵ متری پروفیل به خوبی قابل تشخیص است.

در شکل‌های ۵-۱۳-ب و ۵-۱۳-ج یک هذلولی نزدیک سطح در انتهای پروفیل دیده می‌شود. این هذلولی انطباق خوبی با پاسخ کابل‌های فلزی مشاهده شده در پروفیل‌های X برداشت دارد. از این رو می‌توان آن را ناشی از انشعاب و یا تغییر مسیر کابل‌ها در این منطقه دانست.

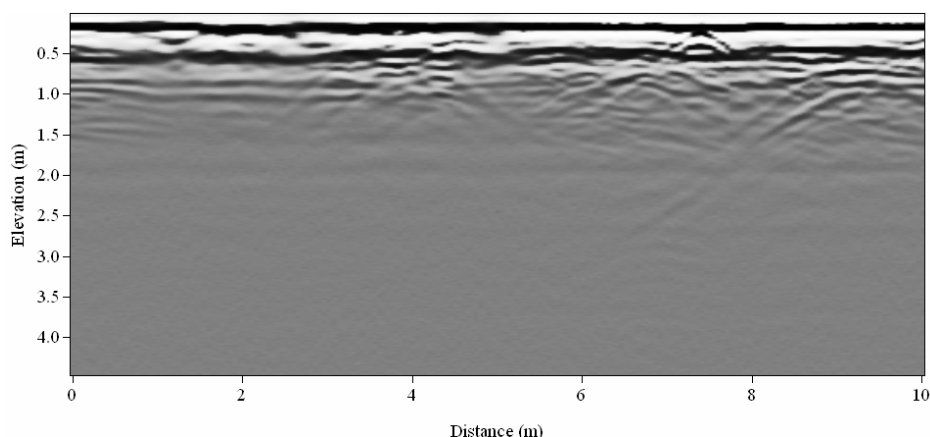
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۵-۱۳: مقاطع عمقی پروفیل‌های Y7 (الف)، Y9 (ب) و Y10 (ج) با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره

اتوماتیک

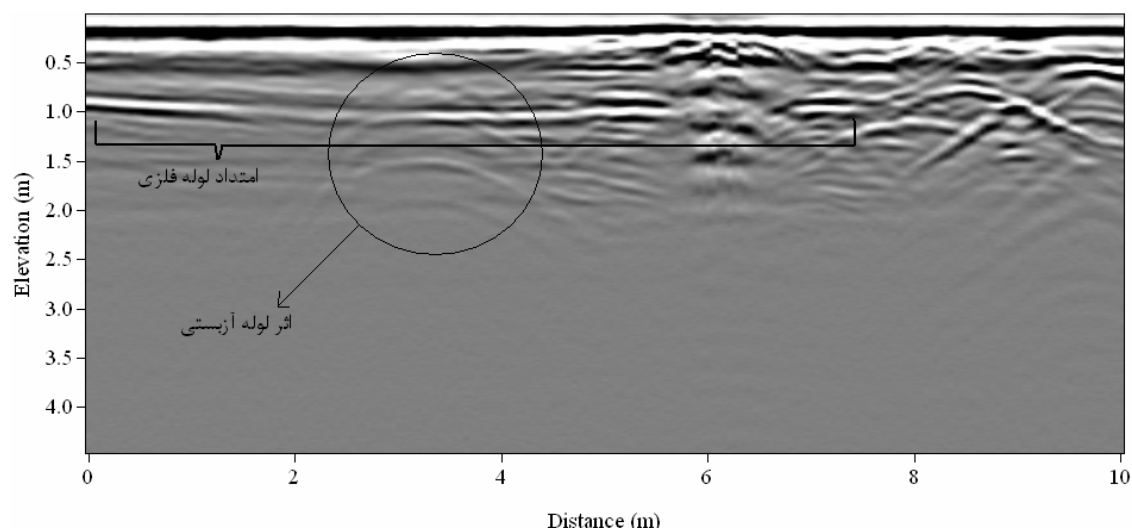
۵-۳- برداشت در امتداد لوله‌های تأسیساتی

در این بخش با نمایش چند پروفیل به بررسی پروفیل‌های برداشت در امتداد لوله‌های تأسیساتی پرداخته خواهد شد.

در شکل ۵-۱۴ مقطع عمقی پروفیل X7 با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC به نمایش درآمده است. این پروفیل در امتداد لوله فلزی انشعاب یافته از لوله‌های شوفاژ قرار دارد. بخشی از این لوله فلزی به طول ۷/۲ متر در شبکه برداشت در امتداد پروفیل X7 این شبکه واقع شده است. به صورتی که از ابتدای پروفیل X7 شروع شده و به نقطه اتصال این لوله با لوله‌های شوفاژ واقع در فاصله ۷/۲ متری پروفیل X7 ختم می‌شود. همان‌طور که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می‌شود، یک بازتاب افقی از ابتدای پروفیل تا فاصله ۷/۲ متری پروفیل و در عمق تقریبی ۱ متری قابل تشخیص است. این بازتاب پاسخ لوله فلزی انشعاب یافته از لوله‌های شوفاژ است.

در فاصله ۳/۳ متری پروفیل، پاسخ لوله آریستی که به صورت عمودی لوله فلزی را در این نقطه قطع می‌کند، قابل تشخیص است. دلیل وجود چنین پاسخی، عبور لوله آریستی از بالای لوله فلزی است. در غیر این صورت اگر از زیر لوله فلزی عبور می‌کرد، به دلیل رسانندگی بالای لوله فلزی، امواج GPR

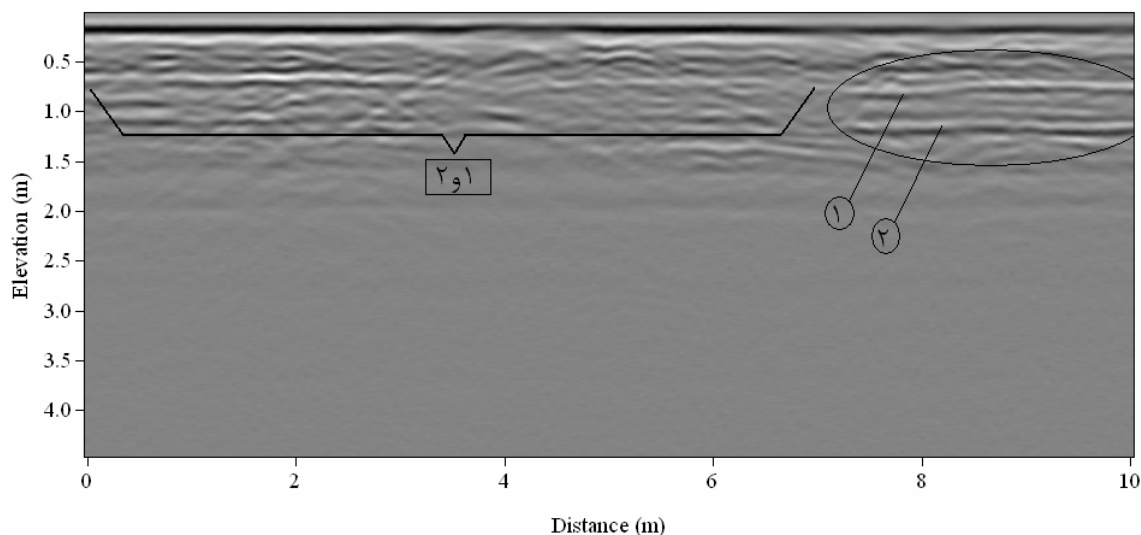
قادر به عبور از لوله فلزی نبوده و احتمالاً پاسخی از لوله آزیستی دریافت نمی‌شد. تفاوت در توان بازتاب این دو لوله به دلیل قطر و یا عمق دفن آنها نیست، بلکه فقط وابسته به جنس این دو لوله است.



شکل ۵-۱۴: مقطع عمقی پروفیل X7 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC

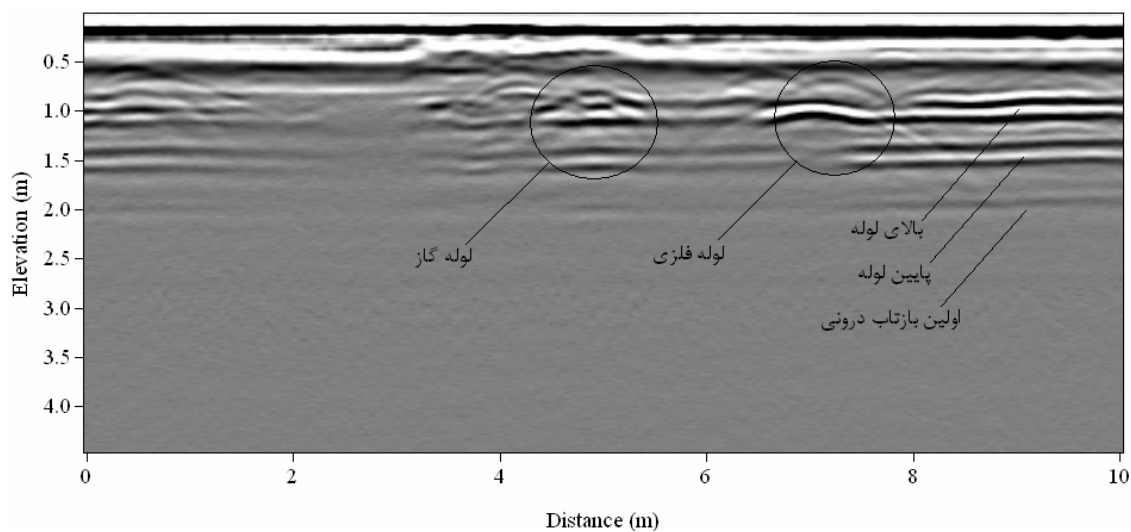
در شکل ۵-۱۵ مقطع عمقی پروفیل Y8 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC با ضریب اتلاف ۳ و ماکزیمم بهره ۱۰۰ به نمایش درآمده است. پروفیل Y8 منطبق بر مسیر لوله‌های شفاژ و در امتداد آنها قرار گرفته است. بازتاب افقی که در کل طول پروفیل مشاهده می‌شود، پاسخ ناشی از لوله‌های شفاژ می‌باشد. پاسخ این لوله‌ها از ابتدای پروفیل تا فاصله تقریباً ۷ متری آن در شکل ۵-۱۵ با شماره (۱ و ۲) مشخص شده است. این پاسخ به صورت یک بازتاب در عمق ۰/۷ متری قابل تشخیص است. پاسخ ناشی از لوله دوم در عمق ۱/۱ متری احتمالاً به دلیل فاصله جانبی کم بین لوله‌ها و واقع شدن در زیر لوله اول، تقریباً قابل تشخیص نیست. اما از فاصله ۷/۲ متری تا انتهای پروفیل دو بازتاب افقی قابل تفکیک در عمق‌های مختلف دیده می‌شود. این دو بازتاب در شکل ۵-۱۵ با شماره ۱ در عمق

۰/۷ متر و با شماره ۲ در عمق ۱/۱ متر نشان داده شده است. جدایش لوله‌های شوفاژ ناشی از انشعاب موجود در این منطقه، (که در پروفیل X7 به آن اشاره شد)، دلیل این امر است.



شکل ۵-۱۵: مقطع عمقی پروفیل Y8 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره SEC

نمونه بارز دیگر در این رابطه پروفیل Y3 است که در امتداد لوله آّبستی برداشت شده است. این پروفیل در شکل ۵-۱۶ به نمایش درآمده است.

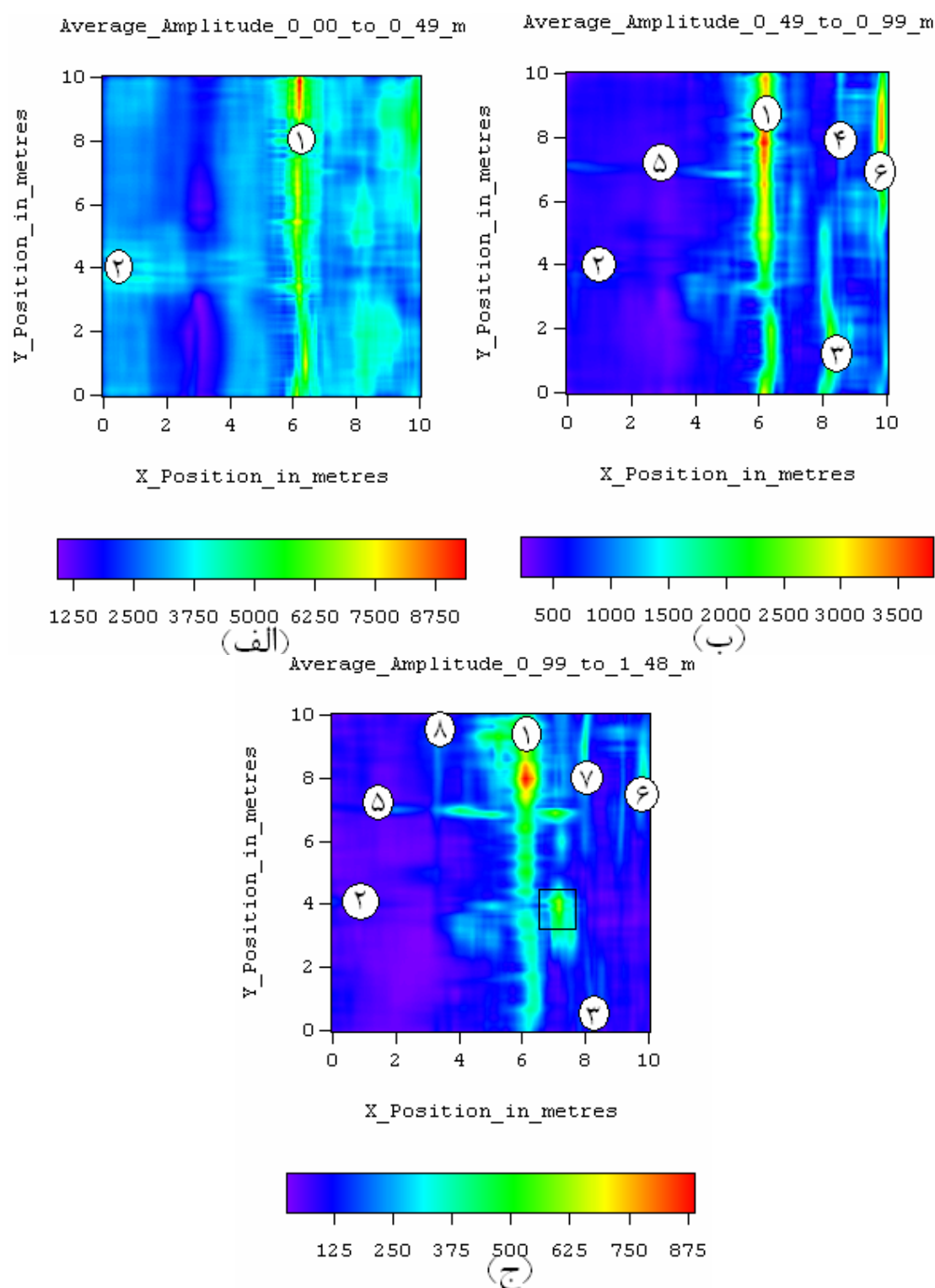


شکل ۵-۱۶: مقطع عمقی پروفیل Y3 با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC

در شکل ۵-۱۶ سه بازتاب افقی در اعماق ۱، ۱/۵ و ۲ متر و تقریباً در تمام طول پروفیل مشاهده می‌شود. این بازتاب‌ها در نگاه اول ممکن است سه لایه افقی تفسیر شود، اما با توجه به پروفیل‌های X برداشت و موقعیت این پروفیل، مشخص می‌شود که این پروفیل تقریباً بر روی لوله آّبستی آب آشامیدنی واقع است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، این بازتاب‌ها به ترتیب ناشی از قسمت‌های فوقانی، پایینی و بازتاب درونی آن می‌باشند. در فاصله‌های ۴/۸ و ۷/۲ متری پروفیل Y3، بی‌هنجاری‌هایی با دایره مشخص شده‌اند. این بی‌هنجاری‌ها اثر لوله گاز (در ۴/۸ متری) و اثر لوله فلزی (در ۷/۲ متری) است. این لوله‌ها در این منطقه به صورت عمود بر لوله آّبستی و از زیر آن عبور کرده‌اند. این لوله‌های فلزی به دلیل توان بازتاب بالای خود پاسخ لوله آّبستی را در این نقاط تحت تاثیر قرار داده‌اند.

۵-۴- بررسی و تفسیر سه‌بعدی شبکه برداشت شده

از آنجا که داده‌های GPR در این بررسی به صورت یک شبکه منظم برداشت شده است، نمایش سه بعدی آنها نیز امکان‌پذیر است. برای نمایش سه‌بعدی این داده‌ها از نرم‌افزارهای EKKO_Mapper و EKKO_3D استفاده می‌شود. مقاطع عمقی منطقه برداشت که با استفاده از نرم‌افزار EKKO_Mapper به دست آمده در شکل ۵-۱۷ و ۵-۱۸ به نمایش درآمده است. برای به دست آوردن مقاطع از پردازش‌های Dewow، میانگین پوش و مهاجرت به ازاء ۰/۱ متر بر نانو ثانیه استفاده شده است. سه مقطع بالایی این منطقه از سطح به طرف عمق از الف تا ج نامگذاری شده و در شکل ۵-۱۷ به نمایش درآمده‌اند.



شکل ۵-۱۷: میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای اعماق ۰ تا ۰/۴۹ متر (الف)، ۰/۴۹ تا ۰/۹۹ متر (ب) و ۰/۹۹ تا

۱/۴۸ متر (ج)

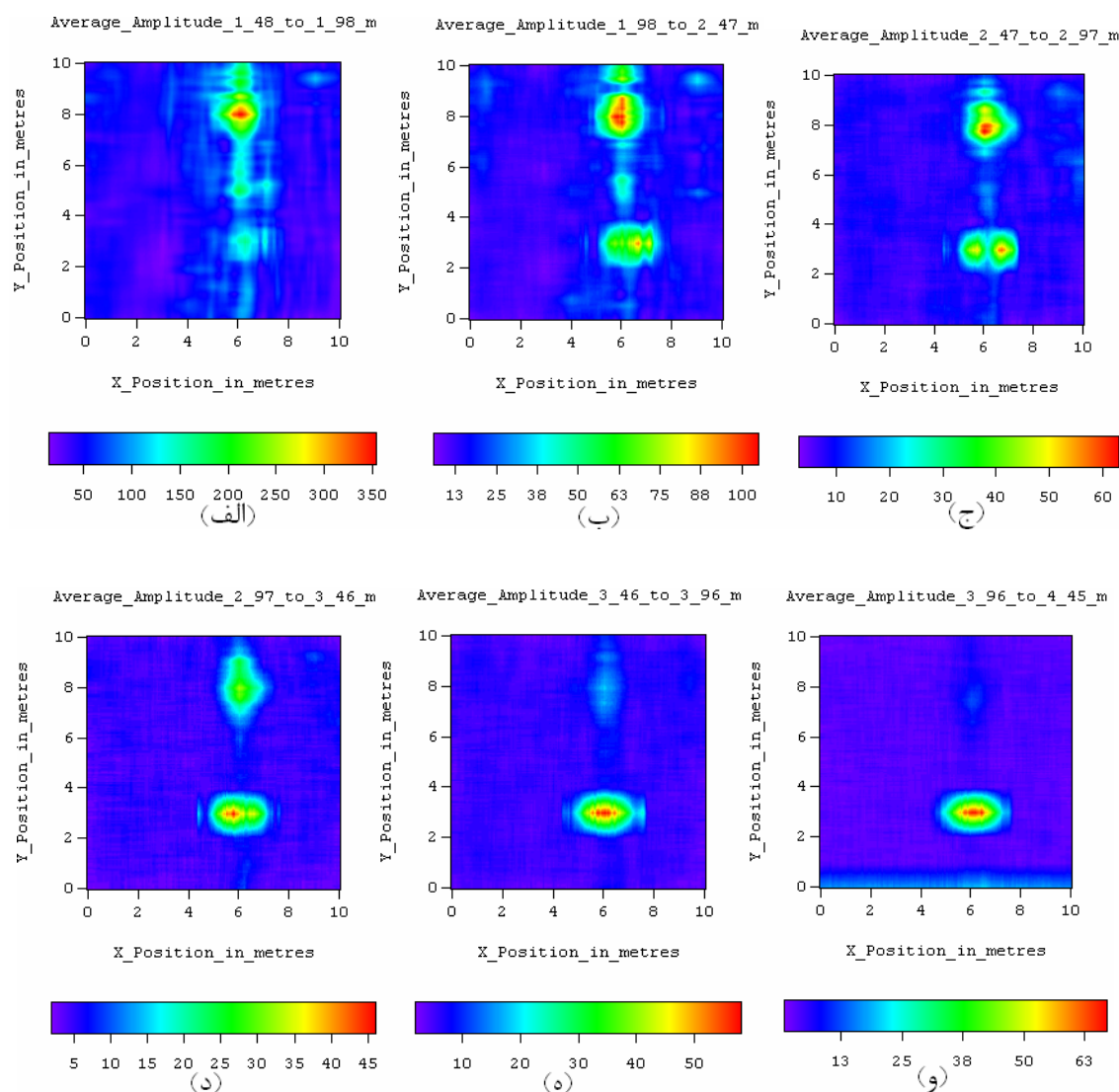
همان‌طور که در شکل ۵-۱۷ مشاهده می‌شود اهداف موجود در شبکه با شماره گذاری در شکل‌های الف، ب، و ج مشخص شده است. مقطع الف از شکل ۵-۱۷، میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۰ تا ۰/۴۹ متر را نشان می‌دهد. در بی‌هنجاری شماره ۱ اثر مربوط به کانال انتقال آب می‌باشد. نزدیک سطح بودن این کانال، و وجود فلزات درون سقف بتونی آن، دلیل بارز بودن این بی‌هنجاری در تمام مقاطع عمقی است. این اثر در فاصله ۶ متری محور X و در امتداد پروفیل Y6 قرار دارد.

اثر شماره ۲ در مقطع الف، منطبق بر ترانشه حفاری به منظور عبور لوله گاز است. اثر لوله گاز با وجود فلزی بودن آن به جز در ۷ متری که در مقطع ج با مربع مشخص شده، در هیچ یک از مقاطع دیده نمی‌شود. همان‌طور که در بررسی پروفیل Y7 در شکل ۵-۱۴ الف به آن اشاره شد، این مسأله احتمالاً از کاهش قابل توجه رسوبات رسی اطراف لوله ناشی شده است.

در مقطع ب از شکل ۵-۱۷ که میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۰/۴۹ تا ۰/۹۹ متر را نشان می‌دهد، بی‌هنجاری‌های بیشتری قابل تشخیص است. شماره ۱ اثر کانال و شماره ۳ اثر لوله‌های شوفاژ می‌باشد که به شکل بارزی در این مقطع دیده می‌شوند. اثر لوله‌های شوفاژ در فاصله ۸/۲ متری محور X و تقریباً تا ۶ متری محور Y ادامه دارد. دنباله اثر لوله‌های شوفاژ که با شماره ۴ مشخص شده است، از ۶ تا ۱۰ متری محور Y در این شکل مشخص شده است. جدایش لوله‌ها از هم (در نقطه‌ای که انشعاب صورت گرفته شده است) و پاسخ از شاخه‌ای از جفت لوله‌ها که در این عمق واقع است، دلیل پاسخ ضعیف، در این ناحیه است. اثر شاخه دوم از این لوله‌ها، به دلیل افزایش عمق دفن آن در این مقطع مشاهده نمی‌شود. ولی این اثر در مقطع عمقی ج از شکل ۵-۱۷، که میانگین دامنه سیگنال برای اعماق ۰/۹۹ تا ۱/۴۸ متر می‌باشد، با شماره ۷ در این شکل مشخص شده است. اثر شماره ۵ که در هردو مقطع عمقی ب و ج از شکل ۵-۱۷ دیده می‌شود، اثر لوله منشعب از لوله‌های شوفاژ در این ناحیه است. این اثر در مقطع ج واضحتر از مقطع ب است، این امر به دلیل واقع شدن این لوله در اعماق بیشتر است. اثر شماره ۸ که در مقطع ج مشاهده می‌شود، اثر لوله آّب‌بستی است. این اثر به دلیل

میانگین دامنه نسبتاً پایین بازتاب از لوله آّبستی، به صورت اثری ضعیف تنها در قسمت انتهایی لوله آّبستی دیده می‌شود. اثر شماره ۶ که در مقطع ب به صورت بارزی قابل تشخیص است، اثر کابل‌های مدفون، در این ناحیه است.

در ادامه مقاطع عمقی منطقه برداشت از عمق ۱/۴۸ تا عمق ۴/۴۵ متر در شکل ۵-۱۸ به نمایش درآمده است.



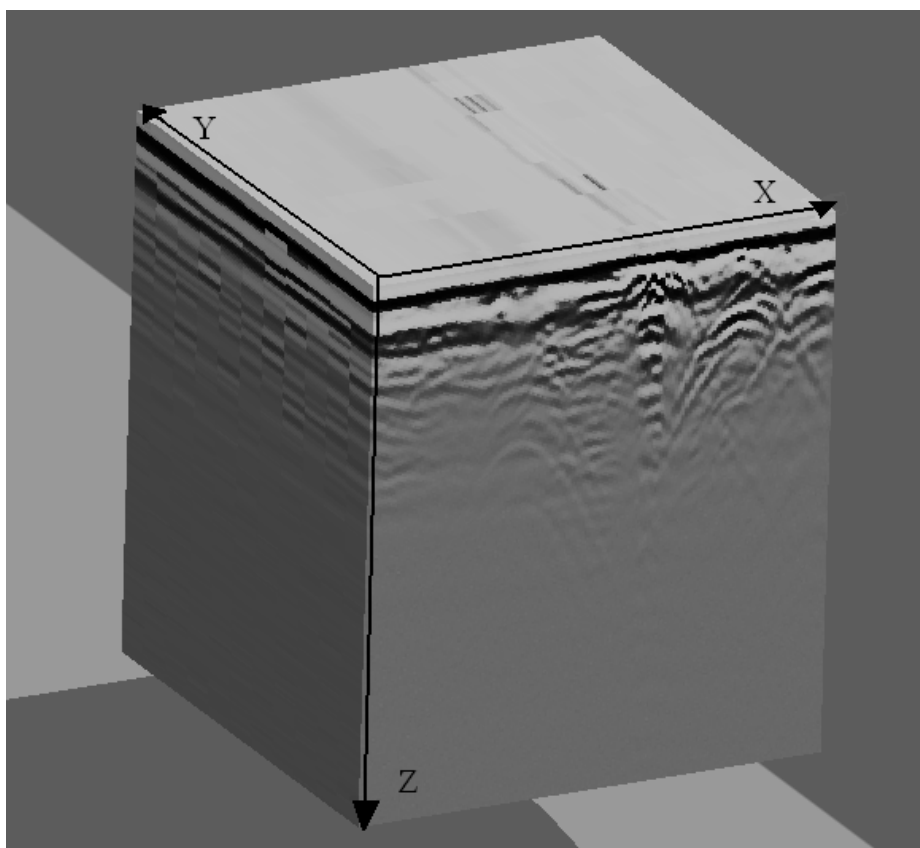
شکل ۵-۱۸: میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق برای اعماق ۱/۴۸ تا ۱/۹۸ متر (الف)، ۱/۹۸ تا ۲/۴۷ متر (ب)،

۲/۴۷ تا ۲/۹۷ متر (ج)، ۲/۹۷ تا ۳/۴۶ متر (د)، ۳/۴۶ تا ۳/۹۶ متر (ه) و ۳/۹۶ تا ۴/۴۵ متر (و)

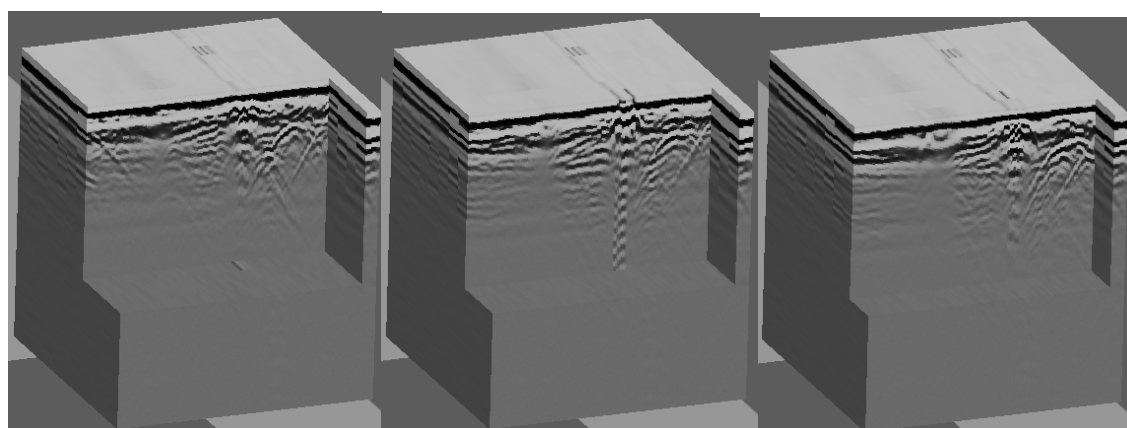
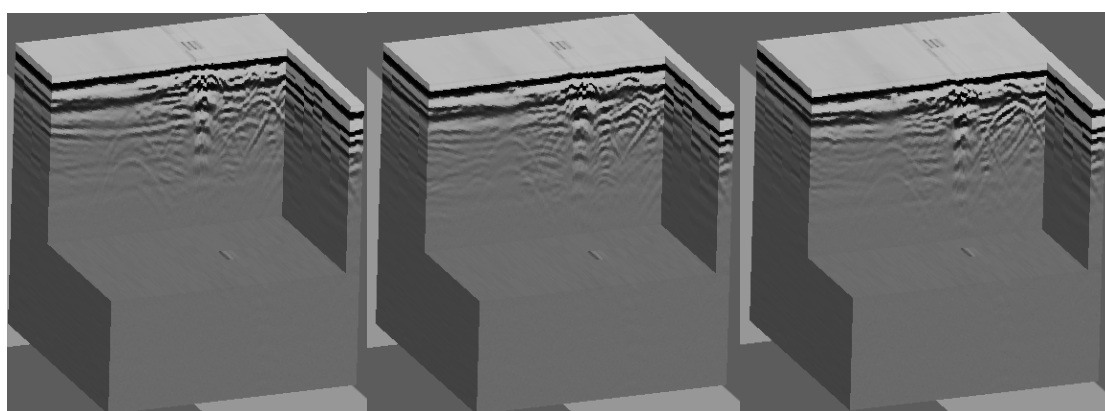
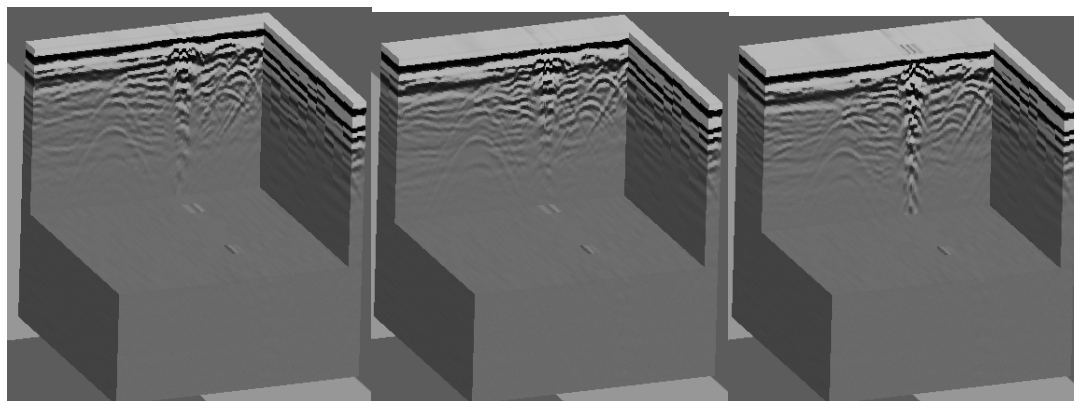
همان‌طور که در شکل ۵-۱۸ دیده می‌شود، تنها اثری که در اعماق بیش از ۱/۴۸ متری قابل تشخیص است، اثر ناشی از کانال و دریاچه‌های فلزی مشبک آن می‌باشد. این اثر به دلیل بازآوایش امواج و به خصوص رینگی شدن آنها در این مقطع، مشاهده می‌شود. همچنین هیچ پاسخی از ساختارهای زیرسطحی در این اعماق دیده نمی‌شود.

برای نمایش مقطع سه‌بعدی داده‌ها، پروفیل‌های X و Y شبکه برداشت را به طور جداگانه با استفاده از نرم‌افزار EKKO_3D به نقشه درآورده‌ایم.

در شکل ۵-۱۹ مقطع سه‌بعدی پروفیل‌های X شبکه و در شکل ۵-۲۰ برش‌های عرضی این مقطع، به نمایش درآمده است. برای نمایش این مقاطع فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

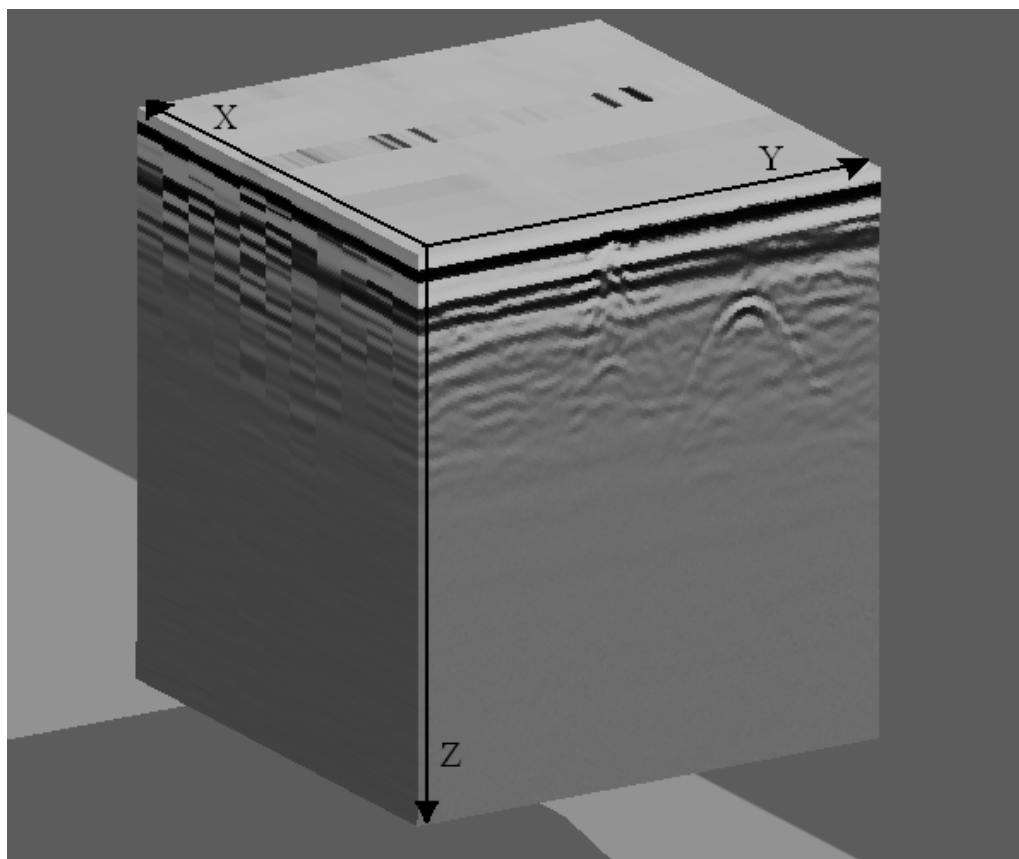


شکل ۵-۱۹: مقطع عمقی 3D پروفیل‌های X با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک

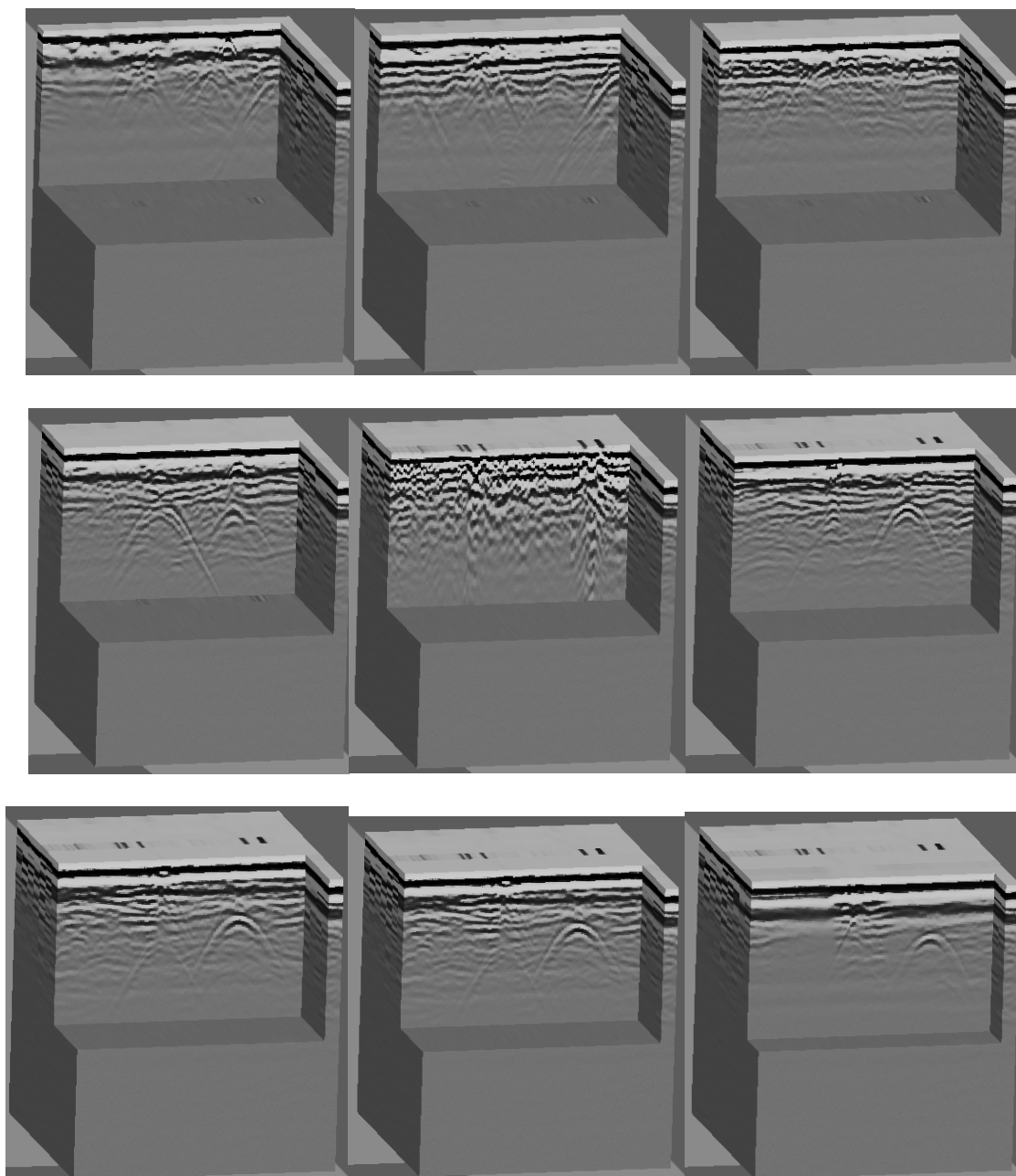


شکل ۵-۲۰: برش‌های عرضی از مقطع 3D پروفیل‌های X شبکه از بالا سمت چپ به پایین سمت راست به ترتیب پروفیل‌های X10 تا X2

شکل ۵-۲۱ مقطع سه‌بعدی پروفیل‌های Y شبکه و در شکل ۵-۲۲ برش‌های عرضی این مقاطع به نمایش درآمده است. برای نمایش این مقاطع فیلتر Dewow و بهره اتوماتیک مورد استفاده قرار گرفته‌اند.



شکل ۵-۲۱: مقطع عمقی 3D پروفیل‌های Y با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره اتوماتیک



شکل ۵-۲۲: برش‌های عرضی از مقطع 3D پروفیل‌های Y شبکه از بالا سمت چپ به پایین سمت راست به ترتیب پروفیل‌های Y10 تا Y2

فصل ششم

بحث، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۶-۱- بحث و نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از انجام این پایان‌نامه را می‌توان به صورت فهرست‌وار زیر بیان کرد:

- برداشت سریع و کم هزینه روش GPR با صرف کمترین نیروی انسانی نسبت به سایر روشهای ژئوفیزیکی قابل توجه است. روش مغناطیس‌سنجی تنها روشی است که از نظر سرعت برداشت و کم هزینه بودن با روش GPR قابل مقایسه است.
- از نظر تأثیر نوفه محیط بر داده‌های برداشت شده، روش مغناطیس‌سنجی در محیط‌های شهری که حاوی نوفه‌های محیطی فراوانی است غیر قابل استفاده می‌باشد در صورتی که روش GPR با آنتن پوششی در چنین محیط‌هایی، همان‌طور که در برداشت داخل محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود شاهد آن بودیم، به خوبی جواب می‌دهد.
- روش GPR در منطقه قلعه شوکت که به منظور آشکارسازی بی‌هنجاری در عمق کم صورت گرفت نسبت به روش مغناطیس‌سنجی از نظر تعیین عمق و محل دقیق بی‌هنجاری‌ها و تفکیک‌پذیری آنها موفق‌تر بوده است.
- از نظر زمین‌شناسی لایه‌های رسوبی که درصد رس و سیلت در آنها بالا است، محیط‌های رسانا محسوب می‌شوند. در چنین محیط‌هایی امواج GPR به شدت استهلاک شده و عمق نفوذ کاهش می‌یابد اما بر خلاف روش GPR در چنین شرایطی روش مغناطیس‌سنجی بهتر عمل کرده است.

- در روش GPR به راحتی می‌توان مقاطع زمانی و عمقی با جزئیات کامل از پاسخ‌های ناشی از تغییرات زیرسطحی ایجاد کرد. در این مورد هیچ یک از روشهای ژئوفیزیکی به جز روش لرزه‌نگاری که آن هم برای چنین عمق و ابعادی امکان پذیر نیست، با روش GPR قابل مقایسه نیستند.
- تصحیح توپوگرافی در روش GPR تنها با داشتن اطلاعات ارتفاعی پروفیل برداشت شده و با اعمال تغییرات ارتفاعی به صورت یک فایل بر روی داده‌های آن پروفیل به راحتی انجام پذیر است. همان طور که در پروفیل‌های برداشت شده در ناحیه قلعه شوکت شاهد تأثیر توپوگرافی جاده بر داده‌ها و تغییرات حاصل از آن که در مقطع زمانی شکل ۴-۱ به صورت یک بی-هنجاری نمایان است، با اعمال تصحیح توپوگرافی این شبهه برطرف شده و پاسخهای ایجاد شده در اثر توپوگرافی جاده به طور دقیق در جای اصلی خود قرار گرفته‌اند. تصحیح توپوگرافی در دیگر روشهای ژئوفیزیکی هم مشکل است و هم به این دقت انجام نمی‌شود.
- برداشت‌های پیوسته با فاصله ایستگاهی ۵ سانتیمتر و همچنین نحوه ارسال امواج GPR که به صورت یک مخروط سه‌بعدی در لایه‌های زیرسطحی نفوذ می‌کند، این امکان را در برداشت به روش GPR ایجاد می‌کند که یک تصویر دقیق و با جزئیات کامل از تغییرات زیرسطحی به دست آید، به طوری که در هیچ یک از روشهای ژئوفیزیکی از جمله مغناطیس‌سنجی این قابلیت وجود ندارد.
- در آشکارسازی لوله‌های مدفون توسط روش GPR، طبق خواص فیزیکی مواد تشکیل دهنده آنها می‌توان لوله‌ها را از نظر جنس و نوع از هم تفکیک کرد. این توانایی روش GPR در مقاطع عمقی بدست آمده از پروفیل‌های برداشت شده در جهت X شبکه برداشت شده در فصل پنجم به نمایش درآمده است. در این مقاطع عمقی دو بازتاب کاملاً متفاوت مشاهده می‌شود که مربوط به دو لوله فلزی و آرزستی است. اختلاف در پاسخ‌ها ناشی از اختلاف جنس لوله‌ها می‌باشد.

- بازتاب‌های ایجاد شده از بالا و پایین لوله آّبستی که به خوبی قابل تفکیک است، به دلیل نفوذپذیری جداره لوله و نیز سرعت پایین امواج GPR در ماده درون لوله است. بنابر این نتیجه می‌گیریم که تفکیک‌پذیری در روش GPR تابعی از سرعت امواج GPR در مواد است.
- در برداشت‌های شبکه‌ای GPR باید دقت کرد فاصله پروفیل‌ها نسبت به عمق مورد بررسی طوری انتخاب شوند که با کمترین پروفیل برداشتی، بهترین همپوشانی ایجاد شده و امکان آشکارسازی تمامی بی‌هنجاری‌های زیرسطحی بوجود آید. همان‌طور که در شبکه برداشت شده که در فصل پنجم شاهد آن هستیم، برای آشکارسازی بی‌هنجاری‌هایی با ابعاد لوله‌های ۶ و ۸ اینچی و حتی کابل با قطر کم در اعماق دفن شدگی بین ۰/۶ تا ۱/۲ متر، فاصله پروفیلی ۱ متر بهترین همپوشانی را ایجاد کرده است.
- برداشت GPR به صورت شبکه این امکان را ایجاد می‌کند که داده‌های بدست آمده را به صورت نقشه‌های سه‌بعدی و مقاطع عمقی سه‌بعدی با دقت و تفکیک‌پذیری بسیار بالا ایجاد کرد. این امر باعث می‌شود پردازش و تفسیر داده‌ها دقیق‌تر انجام گیرد و در نهایت به تفسیر مطمئنی دست یافت.

۶-۲- پیشنهادات

- بنابر پاسخی که به دلیل حضور هوا در داخل کانال موجود در شبکه برداشت شده به‌دست آمده است، پیشنهاد می‌شود یک بررسی در زمینه آشکارسازی شکاف‌ها و حفرات زیرسطحی با مقایسه قابلیت آشکارسازی این اهداف توسط روش GPR و دیگر روش‌های ژئوفیزیکی از قبیل میکروگرانی و یا لرزه‌نگاری صورت گیرد.
- بررسی دانه‌بندی و لایه‌شناسی منطقه مورد مطالعه در این پایان‌نامه با استفاده از دیگر آرایش‌های برداشت در روش GPR مانند توموگرافی و برداشت نقطه میانی مشترک (CMP) پیشنهاد می‌شود.
- امروزه حفظ محیط زیست مقوله‌ای مهم و حائز اهمیت است، روش GPR روشی سریع، غیر مخرب و کم هزینه است که می‌تواند در آشکارسازی محیط‌های آلوده از نظر زیست محیطی، مورد استفاده قرار گیرد مخصوصاً اگر عامل آلوده کننده ناشی از نشت مواد داخل مخازن و لوله‌های ذخیره و انتقال سوخت و یا مواد صنعتی مدفون در زیر سطح باشد. در یک فضای آزمایشگاهی می‌توان با ایجاد شرایطی مشابه شرایط واقعی در ابعاد کوچکتر، با به کارگیری آنتن‌های متفاوت اطلاعات مفیدی در زمینه کشف محل نشت مواد و جنس مواد نشت کرده به‌دست آورد، و یا حتی با آزمایش توانایی این روش در آشکارسازی محل خوردگی و آسیب دیده مخزن و یا لوله، از بروز چنین حوادثی پیشگیری کرد. بنابر این انجام چنین مطالعات آزمایشگاهی، سبب می‌شود تا بتوان تفسیر دقیق‌تر و مطمئن‌تری از داده‌های صحرائی برداشت شده جهت بررسی زیست‌محیطی محل انجام داد.

فهرست منابع

- [۱]. اویسی مؤخر، م.، قاسمی، و.، شاه نظری، ح.، ۱۳۸۴، مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین: دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران
- [۲]. اویسی مؤخر، م.، ۱۳۸۶، بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش رادار: مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱، شماره ۱، صفحه ۸۱-۸۹.
- [۳]. کامکار روحانی، ا. ق.، محمدی ویژه، م.، اویسی مؤخر، م.، ۱۳۸۷، مقایسه روش‌های GPR و مقاومت ویژه در آشکارسازی قنات‌های آب اطراف شاهرود در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی بالا: سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران.
- [۴]. کریم پور، محمد حسن.، سعادت، سعید، ۱۳۸۴، پردازش اطلاعات ماهواره‌ای، بررسی آلتراسیون، ژئوشیمی و کانی سازی مس-طلای پورفیری در شمال شرق کاشمر، مجله دانشکده علوم دانشگاه فردوسی مشهد.
- [۵]. محمدی ویژه، مهدی. ۱۳۸۷، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) در منطقه شاهرود و مقایسه آن با نتایج ژئوالکتریک در منقه مزبور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [6]. Annan, A. P., 2001, **Ground penetrating radar workshop note: Sensors and software.**
- [7]. Bakker MAJ (2004): **The internal structure of Pleistocene push moraines. A multidisciplinary approach with emphasis on ground- penetrating radar.** PhD thesis, Queen Mary, University of London, 177 pp.
- [8]. BERKHOUT, A. J.: **'Wave field extrapolation techniques in seismic migration, a tutorial'**, Geophysics, 1981, 46, pp. 1638-1656
- [9]. Blakely, R.J., **Potential Theory in Gravity and Magnetic Application** Cambridge university Press, 2nd edition, 1996.

- [10]. CLAERBOUT, J. R: **'Imaging the earth's interior'** (Blackwell Scientific Publications, Palo Alto, 1985)
- [11]. Davis J. L., Annan A. P., 1989, **"Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy"** Geophysical Prospect, 3, 531-551.
- [12]. David J. Daniels, (2004), **"Ground Penetrating Radar – 2nd Edition"**, Second edition, The Institution of Electrical Engineers, London, pp.278
- [13]. Dobrin, M.B , and Savit C.H, 1988; Introduction geophysicsl prospecting, McGraw-Hill 867.
- [14]. Fedi, M; Rapolla, A and Russo, G, 1999; **upward continuation of scattered potential field data.** Geophysics , 64, 443-451.
- [15]. Fisher, E., McMechan, G.A., Annan, A.P., Cosway, S.W., 1992, **Examples of reverse-time migration of single-channel, ground penetrating radar profiles:** Geophysics, 57, 577- 586.
- [16]. Jol HM, Bristow CS (2003): **GPR in sediments advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide.** In Bristow C S, Jol H M (eds.) **Ground penetrating radar in sediments.** Geological Society, London Special Publications 211: 9.27
- [17]. Knight, R., 2001, **Ground penetrating radar for environmental applications:** Annu. Rev. Earth Planet. Sci, 29, 229–255.
- [18]. Knodel K, Lange G, Voigt H.J (2007), **"Environmental Geology"**, Springer, pp.283
- [19]. Kofman, R., Ronen, A., Frydman, S., 2006, **Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records:** Journal of Applied Geophysics, 59, 284-299.
- [20]. HAGEDOORN, J. G.: **'A process of seismic reflection interpretation'**, Geophys. Prospect, 1954, 2, pp. 85-127
- [21]. HOGAN, G.: **'Migration of ground penetrating radar data.** Abstracts of 59th annual international meeting on Social exploitation of geophysics, 1988, pp. 345-317
- [22]. Gómez-Ortiz, D., Martín-Velázquez, S., Martín-Crespo, T., Márquez, A., Lillo, J., López, I., Carreño, F., Martín-González, F., Herrera, R., De Pablo, M.A., 2007, **Joint application of ground penetrating radar and electrical resistivity imaging to**

investigate volcanic materials and structures in Tenerife (Canary Islands, Spain): Journal of Applied Geophysics, 62, 287-300.

[23]. McMECHAN, G. A.: '**Migration by extrapolation of time dependent boundary**

values', Geophys. Prospect, 1983, 31, pp. 413-428

[24]. MITCHELL, A. R.: '**Computational methods in partial differential equations'** (John Wiley, 1969)

[25]. Moller I. (2006), "**Ingilise Moller**", Burval, pp.99

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

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

[28]. Reynolds, J.M., 1997, **An Introduction to applied and environmental geophysics:** John Wiley & Sons Ltd.

[29]. Sensors and software, 1999, **EKKO Mapper User's Guide**, Version 2.0.

[30]. Sensors and software, 1999, **Ground penetrating radar survey design.**

[31]. Sensors and software, 1999, **NOGGIN smart system Users Manual**, Version 1.1.

[32]. Sensors and software, 1999, **pulseEKKO crosshole data acquisition Users Guide**, Version 1.0.

[33]. SKOLNIK, M. I. (1970): **Introduction to radar systems.** McGraw-Hill, New York.

[34]. Smith DG, Jol HM (1995): **Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in Quaternary sediments.** Journal of Applied Geophysics

[35]. Sun, J., Young, R.A., 1995, **recognizing surface scattering in ground-penetrating radar data:** Geophysics, 60, 1378-1385.

[36]. Telford, W.M and Geldart, L.P and Sheriff, R.E, 1990, **Applied geophysics second edition** CAMBRIDGE university press

[37]. Usami, T., Ohnishi, S., Odagiri, S., Uekubo, Y., and Jitsumori, A., "**Detection of the Underground Pipes by Synthetic Aperture Techniques,**" Transactions of the IECE of Japan, vol. E69, no. 4, pp. 491-493, Apr. 1986.

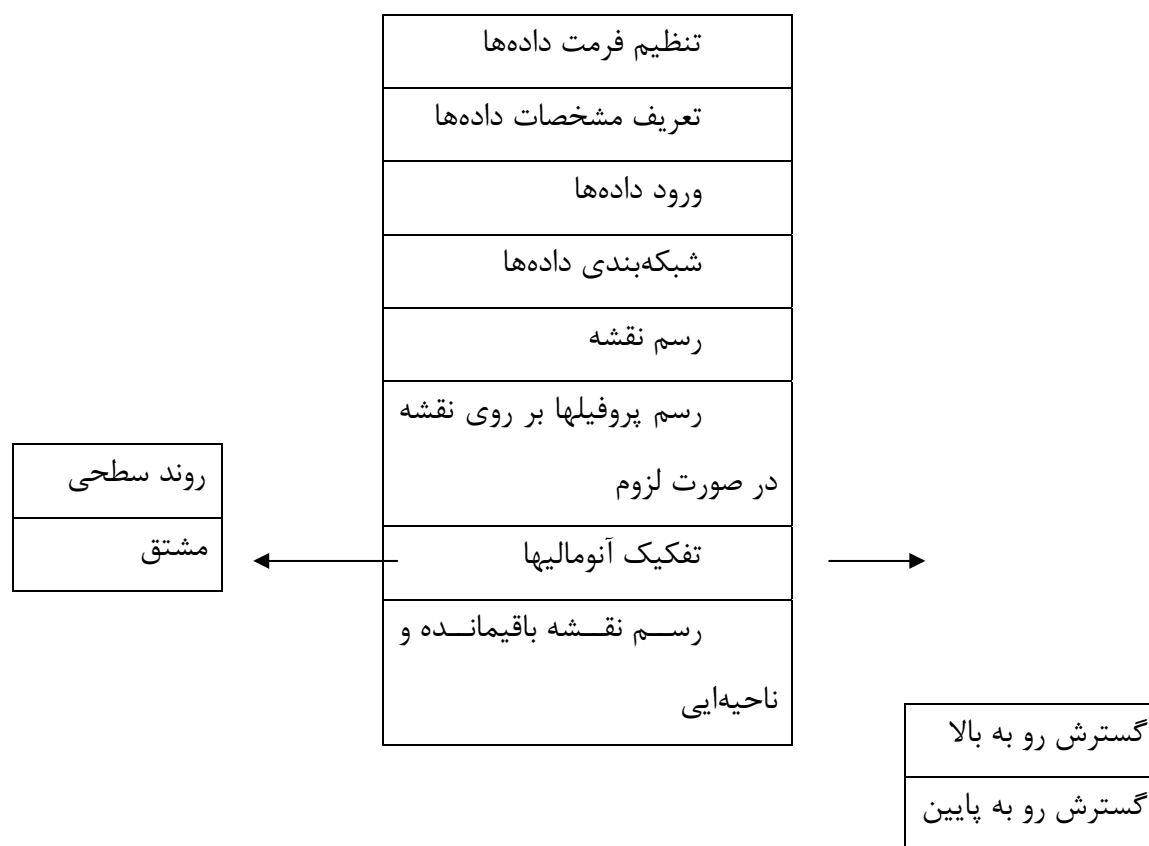
[38]. V. HIPPEL, A. R. (1954): **Dielectrics and waves.** M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts

- [39]. van Overmeeren, R. A., 1994, **Georadar for hydrogeology**: First break, 8, 401-408.
- [40]. Xia, J., Franseen, E.K., Miller, R.D., Weis, T.V., Byrnes, A.P., 2003, **Improving ground-penetrating radar data in sedimentary rocks using deterministic deconvolution**: J. Appl. Geophysics, 54, 15-33.
- [41]. Zeng, X., McMechan, G. A., 1997, **GPR characterization of buried tanks and pipes**: Geophysics, 62, 798-806.
- [42]. www.Googleearth.com
- [43]. www.malags.com
- [44]. www.sensoft.ca

پیوست الف: معرفی نرم افزار Modelvision pro

نرم افزار Modelvision pro یکی از پیشرفته ترین و عمومی ترین سیستمهای تفسیر بر پایه مدل سازی برای حل مسائل میدانهای پتانسیل سه بعدی می باشد که توسط شرکت Encom ارائه شده است. این نرم افزار یک محیط تفسیری کامل در زمینه های مختلف از جمله اکتشاف مواد معدنی، اکتشاف نفت، ژئوفیزیک زیست محیطی و مهندسی می باشد.

۳-۱-۱- مراحل کار با نرم افزار



برای شروع کار، داده ها را به صورت یکی از فرمت های تعریف شده در نرم افزار مرتب می کنیم. به طور مثال فرمت نقطه ای را انتخاب نموده و داده ها را با توجه به این فرمت مرتب می نماییم.

در این مرحله از وارد نمودن داده‌ها به نرم‌افزار، لازم است که مشخصات آنها را در گزینه File>New>Project تعریف نماییم. پس از این کار داده‌های مرتب شده را با استفاده از گزینه زیر وارد می‌کنیم.

File>Import>Point>SimpleXYZ(P.T.S)

با توجه به اینکه داده‌ها دارای فرمت نقطه‌ای می‌باشند، لذا برای انجام مراحل بعدی پردازش و تفسیر بایستی آنها را شبکه‌بندی نمود. برای این کار از گزینه Utility>Grid channel data استفاده نموده و با انتخاب اندازه شبکه‌ها و دیگر پارامترهای لازم شبکه‌بندی می‌کنیم. پس از شبکه‌بندی داده‌ها نوبت به رسم نقشه آن می‌رسد. برای رسم نقشه از گزینه View>Map>contour or Image استفاده می‌کنیم.

به منظور روشهای تفکیک بی‌هنجاری‌ها در مراحل بعدی، لازم است که بر روی نقشه تهیه شده، تعدادی پروفیل^۱ رسم نماییم.

برای کار تفسیر بایستی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای و باقیمانده را از هم تفکیک نمود که در این نرم‌افزار از روشهای مختلفی از جمله روند سطحی، مشتق، گسترش به سمت بالا و پایین استفاده می‌شود. روش روند سطحی با استفاده از گزینه Model>Edit Regional>Magnetic بر روی داده‌ها انجام می‌شود. جهت اعمال این روش بایستی پروفیل‌های رسم شده بر روی نقشه بی‌هنجاری بوگه را فعال سازیم. در مرحله بعد کانال ورودی و درجه چندجمله‌ای بی‌هنجاری ناحیه‌ای را انتخاب و سپس ضرایب چندجمله‌ای مذکور به وسیله گزینه Compute from data محاسبه می‌کنیم سپس دو گزینه Generate Residual Grid و Generate Regional Grid را انتخاب می‌کنیم.

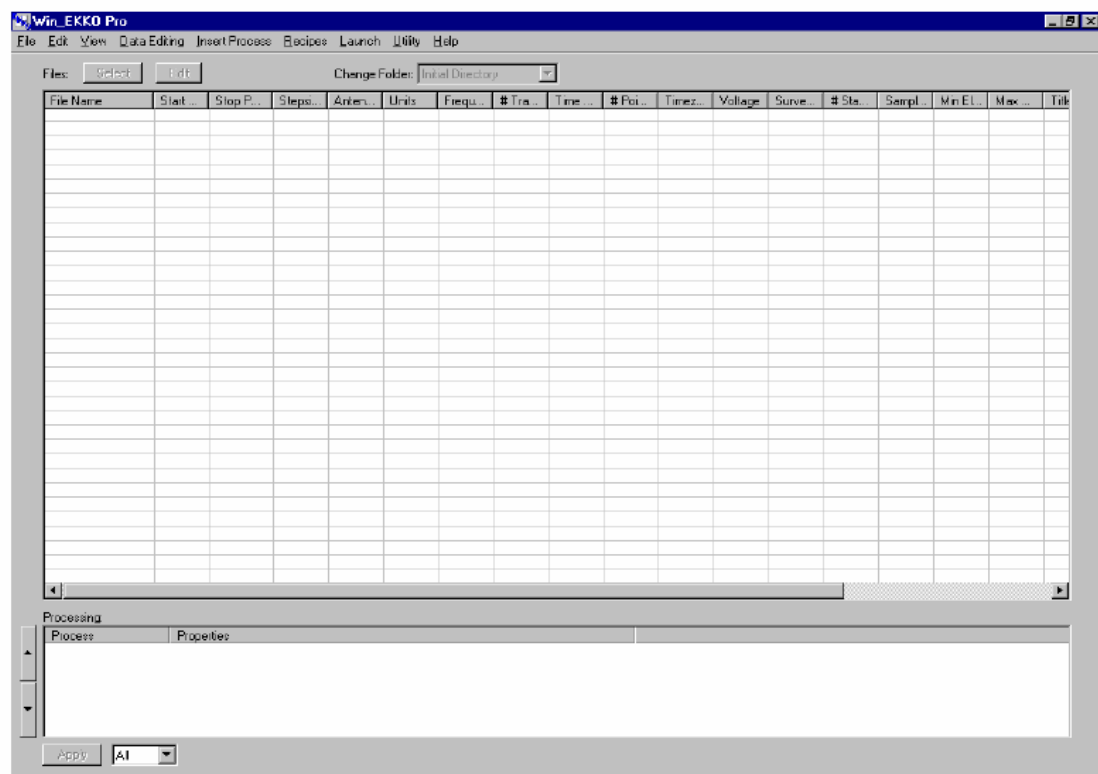
¹ Traverse

با انتخاب گزینه Use seed grid شبکه، بی‌هنجاری ناحیه‌ای خروجی بر اساس مشخصات شبکه انتخابی (از قبیل اندازه شبکه و تعداد نقاط) محاسبه می‌گردد. سپس برای مشاهده و به نقشه در آوردن از گزینه Grid شبکه بندی کرده و مانند قبل در قسمت View قابل مشاهده می‌باشد. برای مشاهده مقاطع عرضی در طول پروفیل‌های رسم شده می‌توان گزینه View>x-section را انتخاب کرد.

پیوست ب: معرفی نرم‌افزار Win_EKKO Pro, V¹:1.0

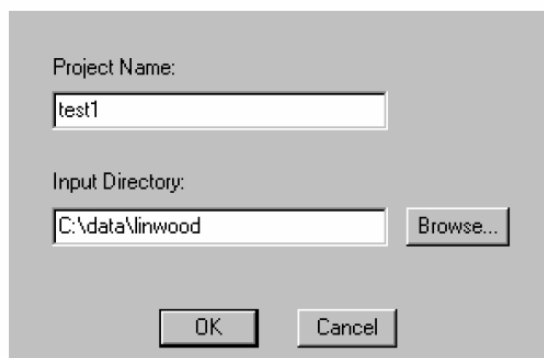
Win_EKKO.pro یک نرم‌افزار کامل و کارآمد برای تصحیحات، پردازش و به نقشه در آوردن داده‌های GPR می‌باشد که توسط شرکت Sensors & Ssoftware ساخته شده است. این نرم‌افزار قادر است داده‌های GPR را به صورت مقاطع زمانی و عمقی دو بعدی نمایش دهد. شکل ب-۱ صفحه اصلی را نمایش می‌دهد که در آن شاهد لیستی از لاین‌های برداشت شده با مشخصاتی از قبیل نقطه شروع و نقطه پایان برداشت در هر لاین، فرکانس مورد استفاده، تعداد ردها، پنجره زمانی و هستیم. تصحیحات و پردازش‌ها می‌تواند روی تمام لاین‌ها و تک تک لاین‌ها اعمال شود، پس از اعمال دستورات می‌توان از طریق سربرگ Recipes داده‌های خروجی را ذخیره کرد. داده‌های اصلی در یک فایل جداگانه ذخیره می‌شوند طوری که ایجاد پروژه و اعمال تصحیحات و پردازش‌ها روی داده‌های اصلی تاثیری ندارد و اعمال پردازش‌های جدید بر روی آنها امکان پذیر است.

¹ Version



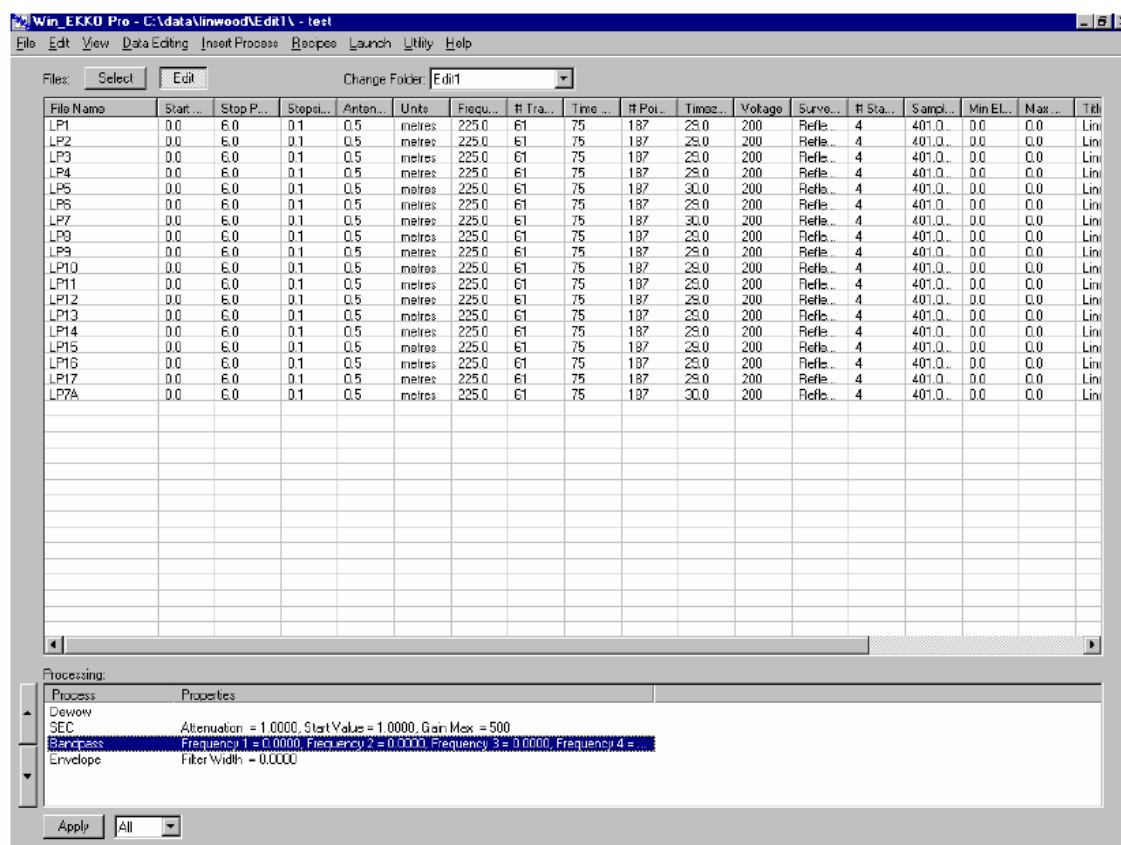
شکل ب-۱: صفحه اصلی نرم افزار Win_EKKO Pro

برای ایجاد یک پروژه جدید، گزینه file – New Project را انتخاب می‌کنیم، پنجره‌ای که در شکل ب-۲ مشاهده می‌کنیم، باز می‌شود. با انتخاب گزینه Browse فایل مربوط به داده‌ها فراخوانی می‌شود. در قسمت Project Nam پروژه را نام گذاری کرده و گزینه OK را انتخاب می‌کنیم.



شکل ب-۲: پنجره ایجاد پروژه جدید

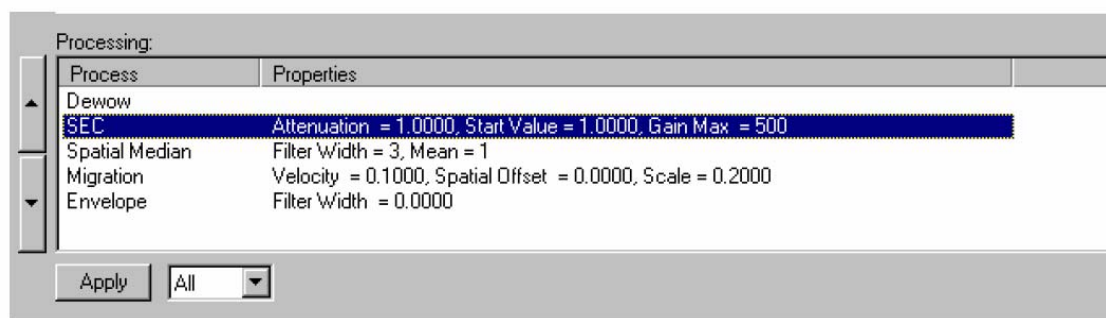
برای فراخوانی پروژه‌های موجود که در گذشته کار شده است می‌توان از گزینه file – OpenProject استفاده کرد. با ایجاد یک پروژه جدید یا فراخوانی پروژه‌های گذشته در صفحه اصلی نرم‌افزار همانطور که در شکل ب-۳ مشاهده می‌شود تمام لاین‌های مربوط به داده‌های برداشت شده با کل مشخصاتشان در سطرهایی با ۲۲ ستون ظاهر می‌شوند.



شکل ب-۳: صفحه اصلی نرم افزار Win_EKKO Pro پس از ایجاد پروژه جدید و فراخوانی داده‌ها

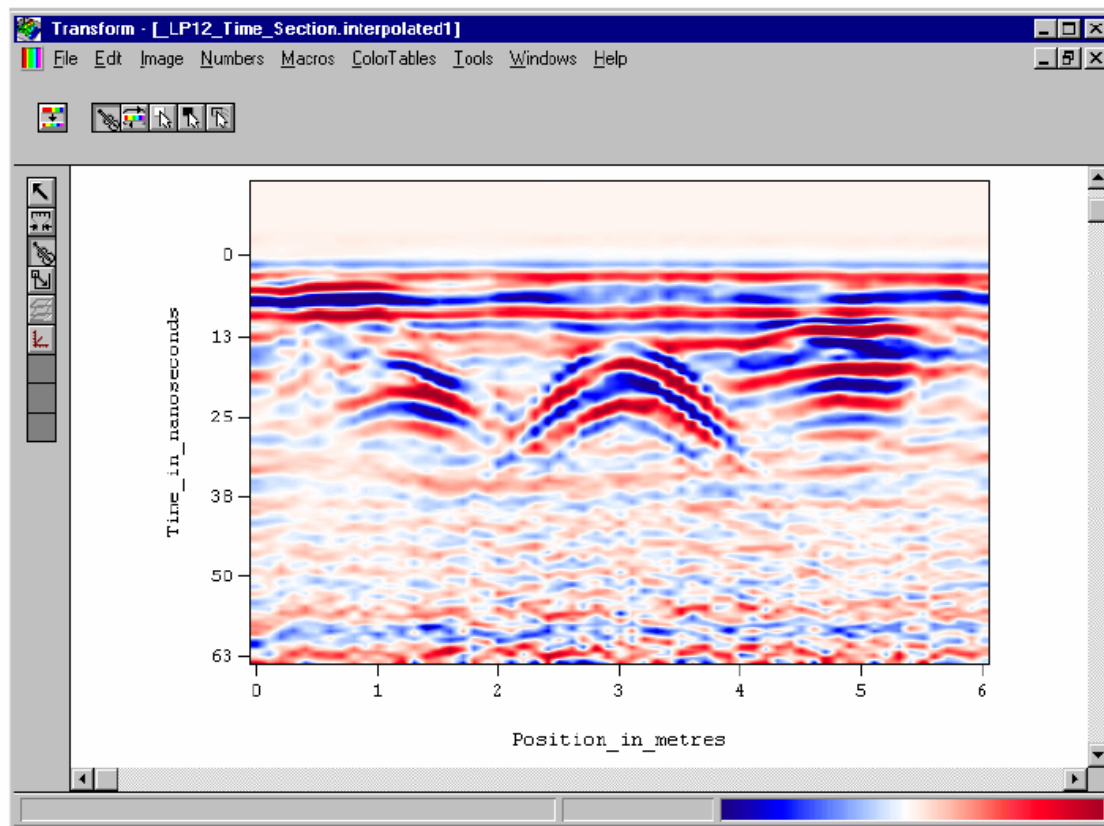
صفحه اصلی نرم‌افزار Win_EKKO.pro شامل یک سطر سربرگ است که در بالای صفحه قرار دارد و همچنین دو فضا که یکی مربوط به نمایش لاین‌های برداشت شده با مشخصاتشان و فضای دیگر مربوط به نمایش پروسه پردازش‌های اعمال شده بر روی داده‌ها می‌باشد. برای اعمال تصحیحات بر روی داده‌ها سربرگ Edit را انتخاب می‌کنیم، این سربرگ شامل گزینه‌هایی است برای تصحیح

داده‌ها که با انتخاب آنها می‌توان تاثیر آن را در تغییرات ایجاد شده در ستون‌های مربوط به مشخصات لاین‌ها مشاهده کرد. برای اعمال پردازش‌ها باید سربرگ Insert Process را انتخاب کرد، این سربرگ شامل چندین گزینه برای پردازش داده‌ها از قبیل بهره‌ها، فیلترها، مهاجرت و است، که با انتخاب هر یک در فضای مربوط به پردازش‌ها می‌توان روال اعمال پردازش‌ها بر روی داده‌ها را مشاهده کرد. همانطور که در شکل ب-۴ مشاهده می‌شود در فضای مربوط به پردازش‌ها ترتیب اعمال پردازش‌ها نمایش داده می‌شود که به راحتی قادر به جابجایی ترتیب اعمال آنها همانطوری که مدنظر ما است، هستیم.



شکل ب-۴: فضای مربوط به نمایش روال پردازش‌ها در صفحه اصلی نرم‌افزار Win_EKKO.pro

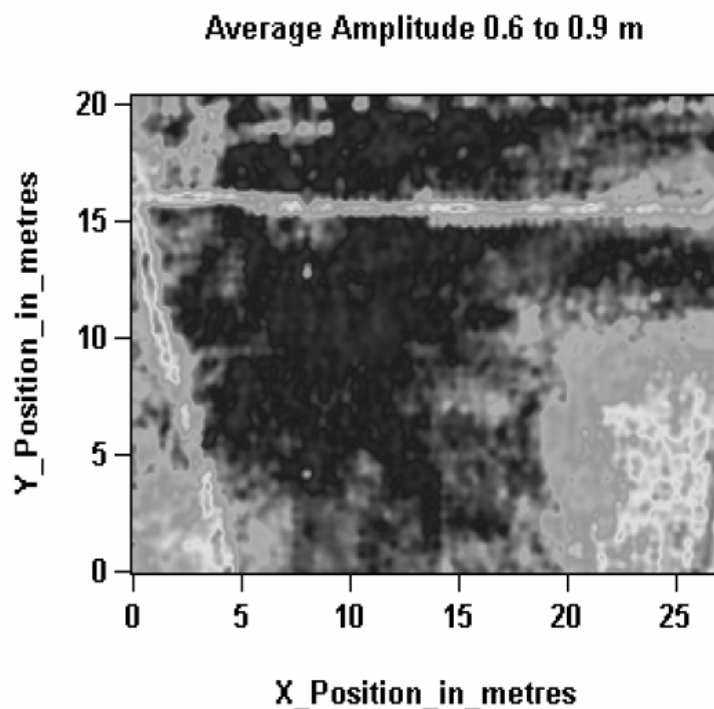
با انتخاب گزینه Apply پردازش‌های مورد نظر بر روی داده‌ها اعمال می‌شود، حال برای نمایش مقاطع ایجاد شده و همچنین مشاهده تصحیحات و پردازش‌های اعمال شده بر روی داده‌ها می‌توان اقدام کرد، با باز کردن سربرگ View و انتخاب گزینه section همانطور که در شکل ب-۵ مشاهده می‌شود، مقاطع زمانی و عمقی داده‌های GPR برداشت شده نمایش داده می‌شوند.



شکل ب-۵: صفحه نمایش مقاطع دو بعدی داده‌های GPR

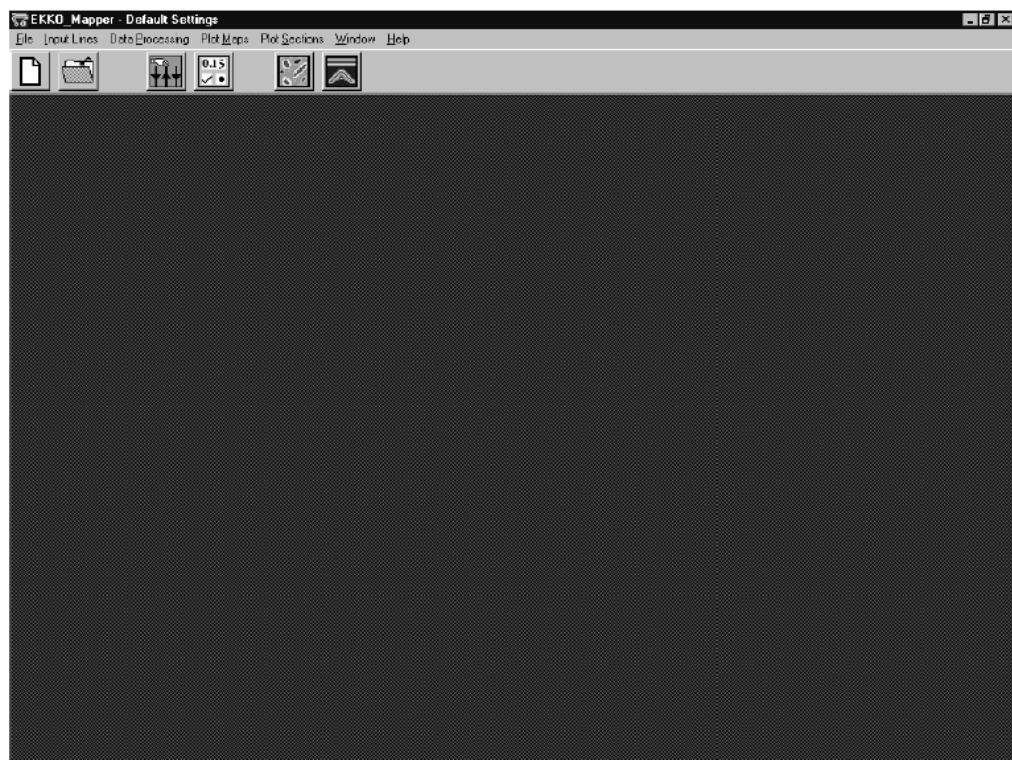
پیوست ج: معرفی نرم افزار EKKO_Mapper, V:2.0

نرم‌افزار EKKO_Mapper نرم‌افزاری است برای ایجاد نقشه‌های مسطح از ناحیه برداشت. در صورتی که برداشت داده‌ها به صورت شبکه‌ای انجام شده باشد با کمک نرم‌افزار EKKO_Mapper می‌توان نقشه‌های مسطح از ناحیه برداشت به صورت ورقه‌هایی از سطح زمین تا عمق که امواج GPR نفوذ کرده‌اند ایجاد کرد، این چنین نقشه‌هایی اطلاعات خوبی از جزئیات اهداف زیرسطحی در اختیار محققین قرار می‌دهند، که این امر از مزایای استفاده از این نرم‌افزار است. شکل ج-۱ یک نمونه از نقشه‌های تولید شده را که متوسط دامنه برای عمق ۰/۶ تا ۰/۹ متری است نشان می‌دهد.

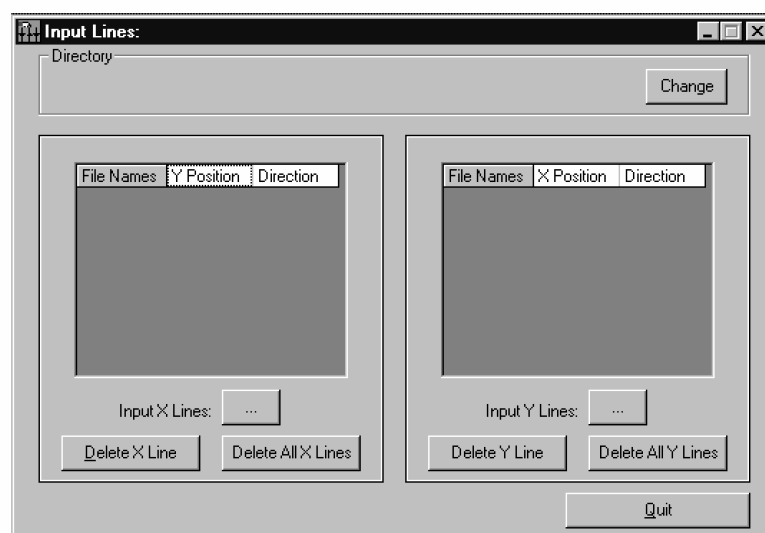


شکل ج-۱: نمونه‌ای از نقشه‌های ایجاد شده توسط نرم‌افزار EKKO_Maper

نرم‌افزار EKKO_Maper دارای یک صفحه اصلی است که در شکل ج-۲ شاهد آن هستیم. برای ایجاد نقشه ابتدا باید یک پروژه جدید ایجاد کنیم، به همین دلیل File – New را انتخاب می‌کنیم. یک پنجره باز می‌شود که در آن باید اسم پروژه را وارد کرده و آن فایل را ذخیره کرد. برای فراخوانی داده‌ها سربرگ Input lines را انتخاب می‌کنیم، پنجره‌ای که در شکل ج-۳ مشاهده می‌شود، باز می‌شود.

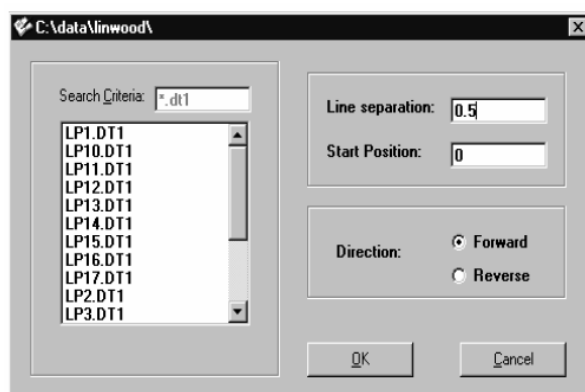


شکل ج-۲: صفحه اصلی نرم افزار EKKO_Mapper

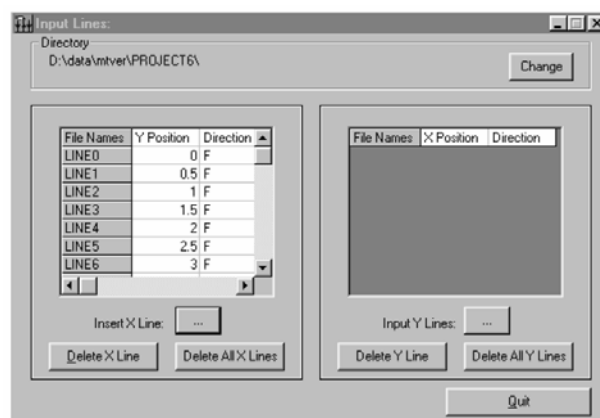


شکل ج-۳: پنجره فراخوانی لاین های شبکه برداشت

در پنجره Input lines دو قسمت تعبیه شده است، قسمت چپ صفحه برای فراخوانی لاین‌های برداشت شده در جهت X شبکه است، که با انتخاب گزینه Input x line پنجره‌ای که در شکل ج-۴ مشاهده می‌گردد، باز می‌شود. در این پنجره کل لاین‌های شبکه برداشت آورده شده است. اول لاین-هایی که در جهت X شبکه برداشت شده‌اند را انتخاب می‌کنیم سپس روی گزینه OK کلیک می‌کنیم، حالا در سمت چپ پنجره Input lines همانطور که در شکل ج-۵ دیده می‌شود، شاهد لاین-های برداشت شده در جهت X شبکه هستیم. این عمل را برای فراخوانی و مشاهده لاین‌های Y نیز در سمت راست پنجره Input lines انجام می‌دهیم در آخر گزینه Quit را در پنجره Input lines انتخاب کرده و پنجره بسته می‌شود.

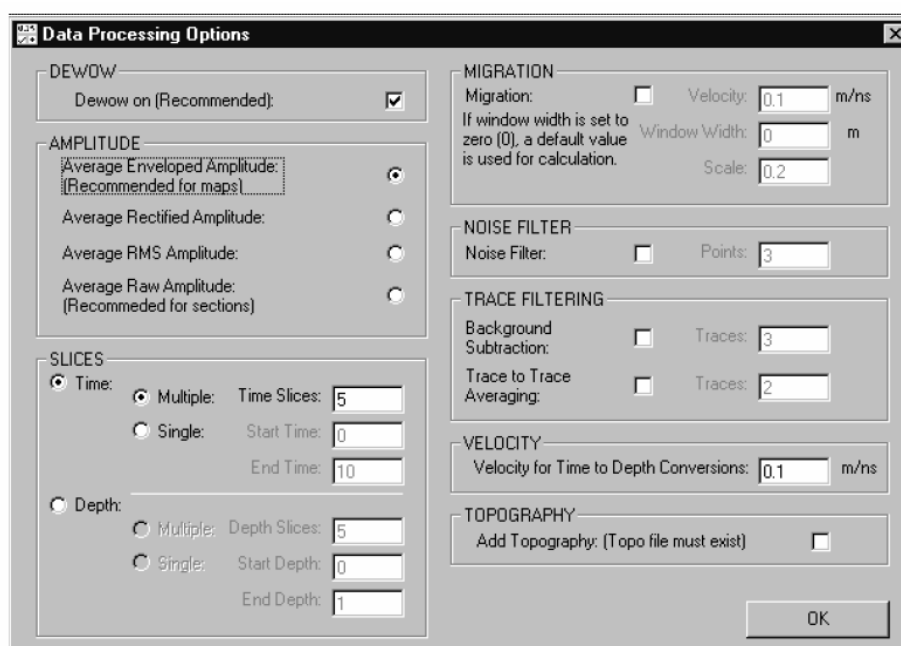


شکل ج-۴: پنجره فراخوانی داده‌ها در لاین‌های X یا Y



شکل ج-۵: نمایش لاین‌های X شبکه برداشت در پنجره Input lines

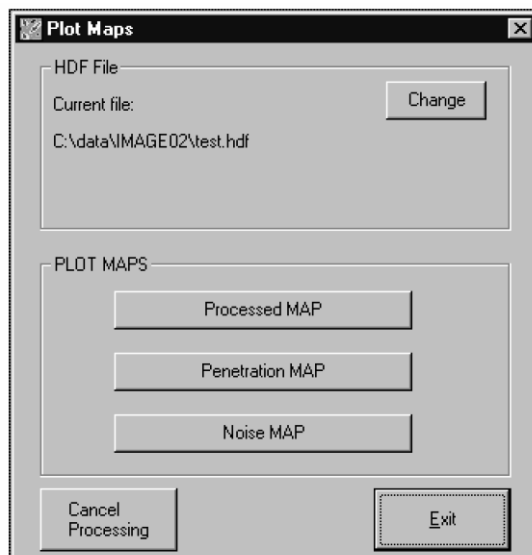
برای اعمال پردازش بر روی داده‌های فراخوانی شده، سربرگ Data processing را در صفحه اصلی نرم‌افزار EKKO _ Mapper انتخاب می‌کنیم، پنجره‌ای که در شکل ج-۶ شاهد آن هستیم باز می‌شود. در پنجره Data processing چندین گزینه برای اعمال پردازش‌های مختلف بر روی داده‌ها و همچنین چگونگی ایجاد نقشه‌ها و نیز نمایش آنها در چند لایه عمقی، تعبیه شده است. پس از اعمال پردازش‌های لازم، روی گزینه OK کلیک کرده تا پنجره بسته شود.



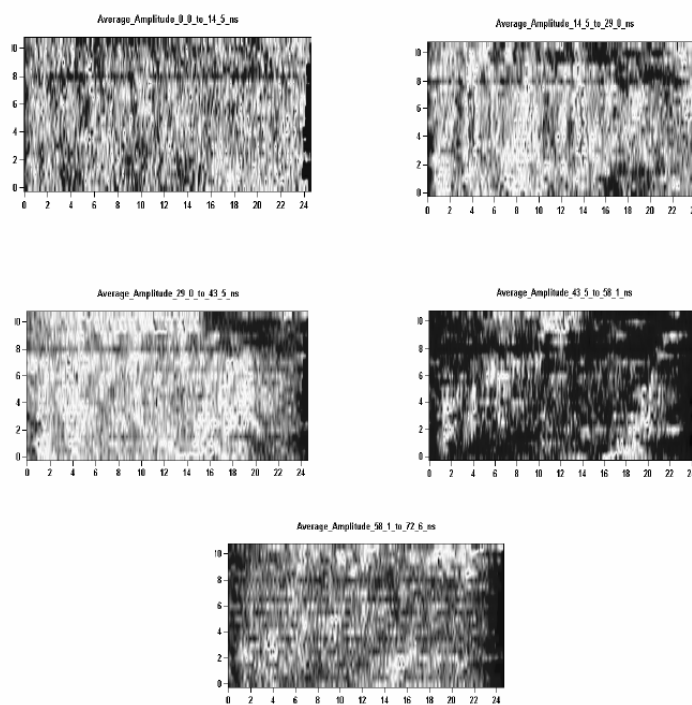
شکل ج-۶: پنجره مشخص کردن روال پردازش و چگونگی نمایش نقشه‌ها

برای اعمال پردازش‌ها و نیز نمایش نقشه‌های ایجاد شده باید در صفحه اصلی نرم‌افزار سربرگ Plot maps را انتخاب کنیم، با انتخاب این گزینه پنجره مربوطه که در شکل ج-۷ شاهد آن هستیم باز می‌شود. در پنجره Plot maps سه گزینه وجود دارد که برای اعمال پردازش‌ها بر روی داده‌ها گزینه اول یعنی Processed map را انتخاب می‌کنیم، با انتخاب این گزینه پس از چند لحظه پردازش‌ها روی داده‌ها اعمال شده و با انتخاب گزینه Exit نقشه‌ها به همان تعدادی که در پنجره Data processing

مقرر کرده بودیم نمایش داده می‌شود. شکل ج-۸ نقشه‌های متوسط دامنه برای اعماق ۰/۲ تا ۱/۳ متر را نشان می‌دهد.



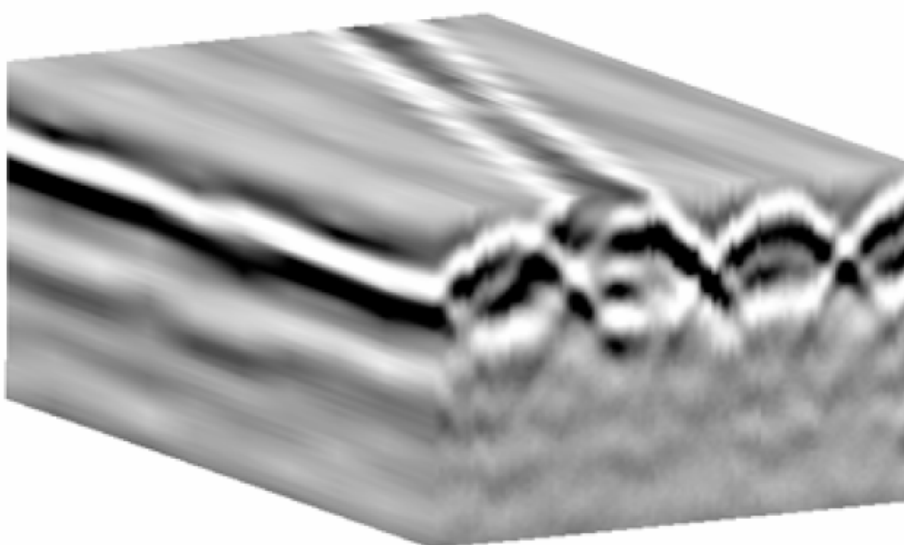
شکل ج-۷: پنجره اعمال پردازش‌ها



شکل ج-۸: نمایش نقشه‌های میانگین دامنه سیگنال بر حسب عمق، ایجاد شده توسط نرم‌افزار EKKO_Maper

پیوست د: معرفی نرم افزار EKKO_3D

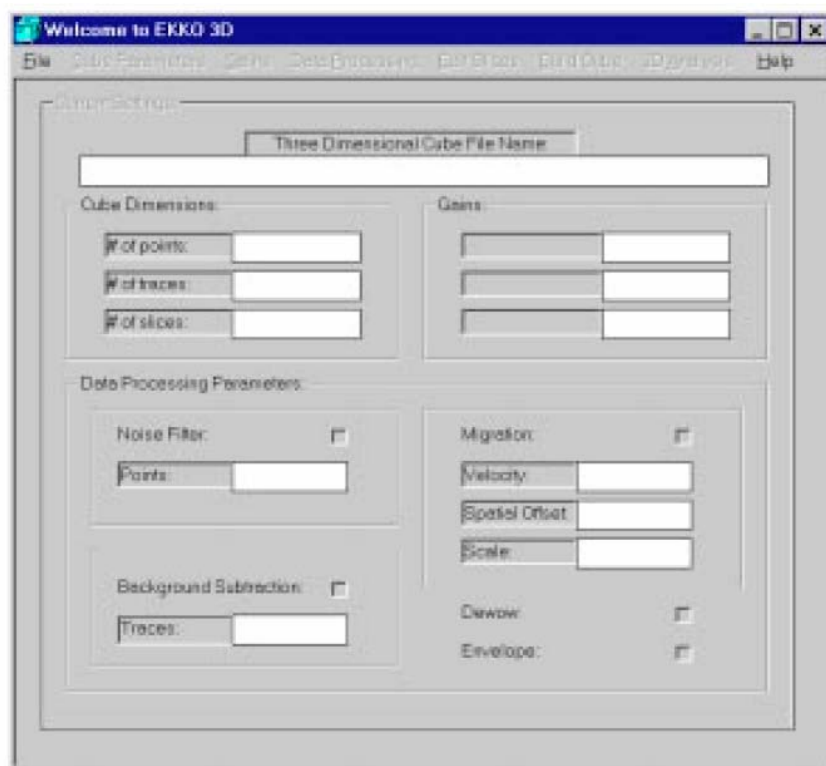
نرم افزار EKKO_3D نرم افزاری است توانا در زمینه نمایش سه بعدی مقاطع زمانی و عمقی داده های GPR این نرم افزار قادر است با کنار هم گذاشتن مقاطع دو بعدی لاین های برداشت شده یک مکعب سه بعدی جهت تجسم و درک بهتر موقعیت اهداف زیرسطحی ایجاد کند. از دیگر توانایی های این نرم افزار می توان به قابلیت چرخش مکعب و نمایش آن از هر زاویه ای که مدنظر است، اشاره کرد همچنین برشهای عرضی و طولی و لایه برداری از مکعب ایجاد شده در اندازه های دلخواه. از دیگر قابلیت های این نرم افزار متحرک سازی و ایجاد فایل های با فرمت AVI و نمایش آنها در Media player است. شکل د-۱ یک مکعب از داده های GPR برداشت شده را نمایش می دهد.



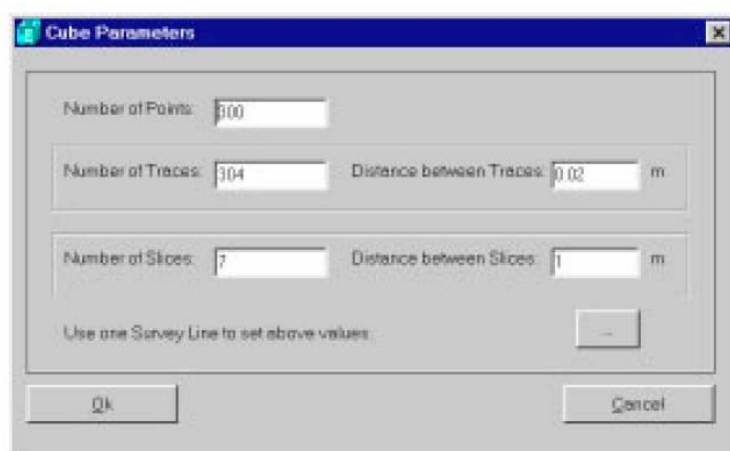
شکل د-۱: نمایش مکعب سه بعدی داده های GPR توسط نرم افزار EKKO_3D

نرم افزار EKKO_3D را اجرا می کنیم اولین پنجره ای که باز می شود صفحه اصلی نرم افزار است که در شکل د-۲ نمایش داده شده است. برای ایجاد یک پروژه جدید و فراخوانی داده ها از سربرگ File گزینه New را انتخاب می کنیم و اسم پروژه را وارد می کنیم و فایل داده ها را انتخاب می کنیم. حال

وارد سربرگ Cube parameters می‌شویم، در این پنجره همانطور که شکل د-۳ مشاهده می‌شود چندین گزینه است که باید با پارامترهای لاین‌ها مطابقت داشته باشد پس از چک کردن مشخصات، روی گزینه OK کلیک می‌کنیم.

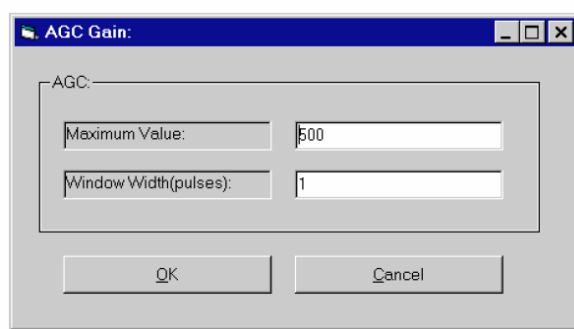


شکل د-۲: صفحه اصلی نرم‌افزار EKKO_3D



شکل د-۳: پنجره تطابق پارامترهای مکعب سه بعدی و لاین‌های برداشت شده

مرحله بعدی اعمال بهره بر روی داده‌ها است که با انتخاب سربرگ Gain گزینه‌های مربوطه نمایان می‌شوند. در این سربرگ پنج گزینه به ترتیب None, Autogain, Constant, AGC, SEC وجود دارد. پس از انتخاب بهره مورد نظر همانطور که در شکل د-۴ مشاهده می‌شود روی گزینه OK کلیک می‌کنیم. برای اعمال پردازش‌ها بر روی داده‌ها سربرگ Data processing را انتخاب می‌کنیم با انتخاب این سربرگ پنجره‌ای که در شکل د-۵ شاهد هستیم باز می‌شود. پس از مشخص کردن روال پردازش، بر روی گزینه OK کلیک می‌کنیم

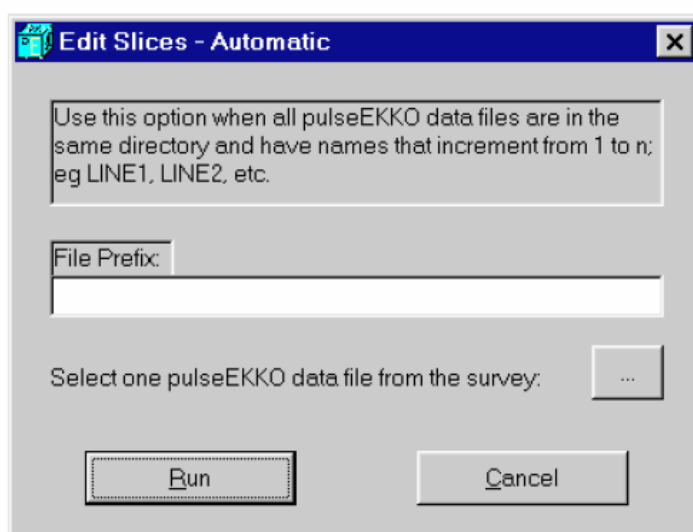


شکل د-۴: پنجره انتخاب بهره‌ها



شکل د-۵: پنجره انتخاب پردازش‌ها بر روی داده‌ها

برای اجرای مرحله بعد سربرگ Edit slices را انتخاب می‌کنیم در این سربرگ دو گزینه Automatic و Manual وجود دارد پس از انتخاب گزینه مورد نظر همانطور که در شکل د-۶ مشاهده می‌شود، به مرحله آخر یعنی ایجاد مکعب داده‌های GPR می‌رسیم، برای اجرای این مرحله سربرگ Build cube را انتخاب می‌کنیم با اجرای این سربرگ می‌توانیم مکعب سه بعدی داده‌ها را مشاهده کنیم.



شکل د-۶: پنجره اعمال تصحیحات بر روی کل داده‌ها

پس از ایجاد مکعب در پنجره مربوطه می‌توان از دیگر توانایی‌های نرم‌افزار EKKO_3D از قبیل چرخش مکعب، لایه برداری از مکعب، ایجاد برش‌های دلخواه، تغییر رنگ مکعب و همچنین متحرک-سازی استفاده کرد. برای مطالعه بیشتر و بررسی قابلیت‌های نرم‌افزار بهتر است به فایل Manual همراه نرم‌افزار مراجعه شود.

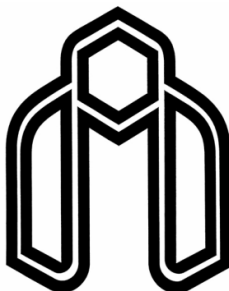
Abstract

Nowadays, transmission and retention of fuels, water and other energy resources by buried pipes, tanks and cables in urban and non-urban areas are necessary. This leads to creation of huge and costly underground networks. Following creation of such networks, a matter that has special importance, is maintenance of these human-made installations to prevent them from possible destructions. These unseen destructions to the installation, located in the subsurface shallow areas, may be made, which can cause considerable financial losses and also irreparable environmental contaminations. In this regard, we can use geophysical methods for maintenance of these installations. Often there is a sufficient physical contrast between these installations and their surrounding media. Thus, these installations are suitable targets for detection by GPR method. In this research work, the processing and interpretation of GPR data acquired from the GPR survey on buried pipes including metallic pipes used for gas transmission have been carried out. To find advantages and disadvantages of GPR method, we have compared the GPR results with the results of processing and interpretation of magnetic survey on the same targets in the study area.

As a result, GPR method has higher resolution in comparison to magnetic method. However, GPR waves in subsurface media having high electrical conductive are intensively attenuated, and hence, the depth of penetration in this method is limited. As can be seen from the GPR depth sections obtained from the survey area, the depth of penetration is even less than 2 meters. Magnetic method, despite its weak resolution, can detect the targets in high electrical conductive media more successfully compared to GPR method if there is a good magnetic susceptibility contrast between the target and the surrounding medium. In urban areas, where high noise levels exist, magnetic surveys cannot successfully be performed, while applying GPR method using shielded antenna in such areas can have acceptable or even good results. A GPR survey can also be performed on a grid leading to producing three-dimensional (3-D) maps that contain relatively accurate, reliable and abundant information from the subsurface targets in the survey area. In this research thesis, the detection of buried gas pipelines and other shallow subsurface targets by GPR method in Qaleh-Showkat area, that is approximately located 10 kilometers to the west of Shahrood city, has been investigated, and also, the GPR results have been compared with the results of the magnetic survey in the area. From this comparison, we can see that GPR method as a high resolution geophysical method in detection of small anomalies, located at shallow depths and near together,

contain much better results. However, in some parts of the survey area in which their electrical conductivities are high, GPR method has not been able to detect the subsurface targets or anomalies due to high attenuation of the GPR waves in these parts, and in such situations, magnetic survey can have better results.

In addition, in this research work, a GPR survey has been performed on a grid, and the acquired data has been investigated in a 3-D form. This GPR survey has been carried out inside the main campus of Shahrood University of Technology where high level of noise in the survey area, impeded us to run a magnetic survey in the area. Thus, in this area, we have not been able to obtain the magnetic results, and thus, compare the magnetic results with the GPR results, obtained from the GPR survey in the area. As a result of this GPR survey, the subsurface targets at different depths in 3-D maps have been detected with relatively good accuracy and resolution. These 3-D maps can considerably help the interpreter to interpret the GPR data results reliably and accurately. Moreover, significant and relatively comprehensive information from the subsurface is obtained. 3-D presentation of the GPR data results is very useful in the 3-D visualization of the subsurface, and thus, can indicate the targets more sensibly.



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

MSc Thesis in Geophysics

**Acquisition, processing and interpretation of ground
penetrating radar (GPR) and comparison of the
results with geomagnetic results in Shahrood area**

**Student
Masoud Hosseini**

**Supervisor
Dr Abolghasem Kamkar Rouhani**

**Adviser
Mr Mehdi Mohammadi Vizheh**

August 2009