

آشکارسازی تأسیسات زیرسطحی و تحلیل مشخصه‌های تپ GPR

مهدی محمدی‌ویژه^۱ و ابوالقاسم کامکار روحانی^{۲*}

^۱سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران
^۲دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۳/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۵/۷)

چکیده

آشکارسازی تأسیسات زیرسطحی و آگاهی از مشخصات و محل دفن دقیق آنها یکی از چالش‌هایی است که مهندسان تأسیسات همواره با آن مواجه‌اند. گسترش شهرها و به‌واسطه آن نیاز به توسعه شبکه‌های تأسیساتی و رفاهی جدید و همچنین نیاز به تعمیر و نگهداری از شبکه‌های قدیمی‌تر، تعیین محل دقیق آنها را بسیار پراهمیت ساخته است. در این راستا روش‌های غیر مخرب به‌منظور صرفه‌جویی در وقت و هزینه و همچنین کاهش اختلال‌های ناشی از حفاری‌های بی‌مورد در مناطق شهری، مورد توجه بسیاری از مهندسان این رشته قرار گرفته است. یکی از روش‌های ژئوفیزیک نزدیک سطح که در سال‌های اخیر در این زمینه موفقیت‌هایی حاصل کرده، روش GPR است. در این تحقیق با در نظر گرفتن چند مورد متفاوت تحقیقاتی در شرایط متفاوت زیرسطحی قابلیت روش GPR در تعیین محل دقیق این‌گونه ساختارها، مورد بررسی قرار گرفته است. به‌علاوه در این تحقیق با رویکردی متفاوت در تفسیر داده‌ها، با تحلیل مشخصه‌های دامنه، فاز و بسامد تپ‌های GPR سعی در دریافت حداکثر اطلاعات از مقطع‌های GPR شده است.

برداشت سه‌بعدی داده‌ها در یکی از سایت‌های مورد بررسی، پردازش، تفسیر و نمایش سه‌بعدی ساختارهای زیرسطحی را ممکن ساخته است. از طرفی برداشت‌های مقاومت ویژه در این منطقه، بررسی و تطبیق نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های GPR را فراهم کرده است. با در نظر گرفتن یک نیم‌رخ روی محیط‌های با رسانندگی الکتریکی زیاد، تأثیر نامطلوب رسانندگی محیط برداشت در اندازه‌گیری‌های GPR نشان داده شده است. از آنجاکه مقاومت ویژه محیط‌های زیرسطحی نقش مهمی در نفوذ امواج ایفا می‌کند، با تحلیل طیف بسامد تپ‌های GPR در این محیط، برآوردی از مقاومت ویژه محیط زیرسطحی به‌دست آمده است. همچنین با تحلیل این طیف، نوفه‌های سامان‌مند که در اندازه‌گیری‌های GPR تأثیرگذار و دارای بسامد متفاوتی از سیگنال‌ها هستند، قابل شناسایی‌اند. در ادامه با در نظر گرفتن یک نیم‌رخ روی تأسیسات فلزی و غیرفلزی دانشگاه صنعتی شاهرود، بررسی‌های جزئی‌تر روی این‌گونه هدف‌ها صورت گرفته است. در این سایت برآورد قطر لوله غیرفلزی محتوی آب با استفاده از اطلاعات موجود در مقطع زمانی GPR، با دقت خوبی ممکن شده است. همچنین با تحلیل مشخصه‌های دامنه و فاز تپ‌های دریافتی در قسمت‌هایی از این نیم‌رخ، پاسخ‌های فلزی و غیرفلزی مورد بررسی، تفکیک‌پذیر است. در خاتمه این مقاله با در نظر گرفتن یک نیم‌رخ روی لوله‌های غیرفلزی، اثر شارجه محتوی آنها در اندازه‌گیری‌های GPR بررسی شده است.

واژه‌های کلیدی: رادار نفوذی به زمین (GPR)، تأسیسات مدفون، پردازش، تحلیل دامنه، فاز و طیف بسامد

Detection of subsurface installations and analysis of GPR pulse characteristics

Mehdi Mohammadi Vizheh¹ and Abolghasem Kamkar Rouhani^{2*}

¹Geophysics Group, Department of Exploration, Geological Survey of Iran

²School of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering, Shahrood University of Technology, Iran

(Received: 21 May 2012, accepted: 29 July 2013)

*Corresponding author:

kamkarr@yahoo.com

*نگارنده رابط:

Summary

Detection of subsurface installations and knowing their characteristics and accurate burial places are some challenges that the engineers involved always face with. Urban development, and thus, the necessity for the development of new and convenient installation networks and also the need for maintenance of old installation networks indicate the significance of accurate placement of the subsurface installations. In this regard, non-destructive methods have been considered to be used by many engineers in this field in order to save time and costs and also to reduce the disturbances due to unnecessary drillings in urban areas. In general, geophysical methods are among the most important non-destructive methods. One of shallow subsurface geophysical methods which has obtained some degree of success in this regard is the ground penetrating radar (GPR) method. In this research work, the GPR method is applied in several case studies having different subsurface conditions, and thus, the capability of the GPR method is investigated for accurate placement of subsurface installations in these case studies. Furthermore, we use a different procedure in data interpretation and analysis to analyze the characteristics of amplitude, phase and frequencies of GPR pulses in order to derive maximum information from GPR sections.

Three-dimensional (3D) data survey in one of case studies carried out in this research work had made it possible to process, interpret, and visualize subsurface structures in 3D form. Besides, resistivity surveys in the study area had provided us with the possibility of investigation and correlation of the GPR data results with the resistivity findings. Considering that a survey line had been carried out on the subsurface media containing high electrical conductivities, the unfavorable influence of the conductivities of survey media on the GPR measurements made along the survey line was indicated. Since the resistivities (or conductivities) of the subsurface media play an important role in the penetration of GPR waves, we can estimate the resistivities of the subsurface media by analyzing the frequency spectrum of the GPR pulses propagated in the media. Furthermore, the systematic noise affecting the GPR measurements is recognized by this frequency-spectrum analysis as this noise has frequencies different from those of signals. This study also considers GPR and resistivity investigations along a survey line crossing subsurface metallic and non-metallic installations, and thus, detailed investigations made on these subsurface targets. In this area, an estimation of the diameter of the non-metallic pipe installed for transferring of water in the subsurface has been made with a good accuracy from the acquired GPR time section along the survey line. Moreover, the analysis of amplitude and phase characteristics of the GPR pulses from some parts of the survey line has made it possible to distinguish or separate GPR responses of metallic installations from non-metallic ones. Finally, by considering GPR measurements along a survey line passing a subsurface non-metallic pipe, we investigated the effect of the fluid inside the pipe.

Keywords: Ground penetrating radar (GPR), buried installation, processing, amplitude, phase and frequency spectrum analysis

۱ مقدمه

محیط‌های زیرسطحی را سبب شده است. کانال‌ها و آبراهه‌ها، شبکه‌های آب و فاضلاب شهری، لوله‌های انتقال گاز و خطوط ارتباطی مدفون در خاک از جمله تأسیساتی هستند که عموماً نقشه‌های دقیق و روزآمد از

امروزه توسعه شبکه‌های تأسیساتی و رفاهی به واسطه گسترش شهرها و جمعیت آنها، امری اجتناب ناپذیر به نظر می‌رسد. این امر نیاز روز افزون بشر به بهره‌وری از

الکترومغناطیسی در فصل مشترک دو محیط است (پاراسنیس، ۱۹۹۷). مقدار انرژی بازتابی و عبوری و همچنین مقدار انرژی اتلاfi (مستهلك شده) بستگی به خواص الکتریکی مواد در دو طرف فصل مشترک دارد. اگر زمان رفت و برگشت موج الکترومغناطیسی را بعد از بازتاب از اهداف زیرسطحی اندازه‌گیری کرده باشیم، می‌توانیم عمق هدف موردنظر را با استفاده از رابطه (۱) تعیین کنیم (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$D = \frac{Vt}{2}, \quad (1)$$

که D عمق هدف، t زمان متناظر با آن در مقطع زمانی GPR و V سرعت امواج الکترومغناطیسی GPR تا هدف زیرسطحی است. در صورتی که فاصله بین آنتن‌ها در مقایسه با عمق هدف کوچک باشد، این رابطه با دقت خوبی عمق هدف زیرسطحی را نشان می‌دهد.

سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی با رابطه (۲) محاسبه می‌شود (نیل، ۲۰۰۴):

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

که C_0 سرعت موج الکترومغناطیسی در هوا، ϵ_r گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا، μ_r نشان‌دهنده تراوایی مغناطیسی نسبی و ω بسامد زاویه‌ای تپ GPR است. عبارت $\sigma/\epsilon\omega$ که به فاکتور اتلاف (Loss factor) معروف است، در محیط‌های کم‌اتلاف مانند شن و ماسه‌های خالص نزدیک به صفر و صرف‌نظر کردنی است (جدول ۱). همچنین اثر μ_r در محیط‌های غیرمغناطیسی و در محدوده بسامدهای GPR کوچک است و می‌توان آن را مطابق با محیط‌های غیرمغناطیسی برابر ۱ در نظر گرفت. به این ترتیب رابطه (۲) به صورت زیر خلاصه می‌شود (رینولدز، ۱۹۹۷ و پاراسنیس، ۱۹۹۷):

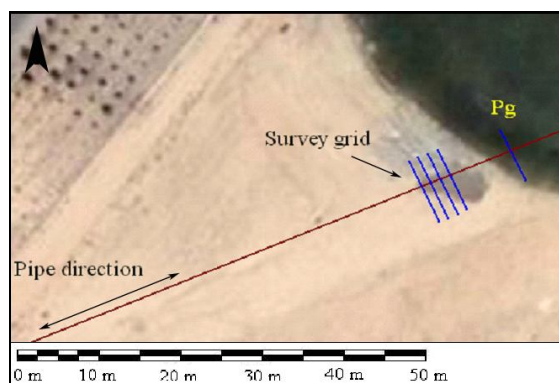
$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad (3)$$

محل دفن آنها در دسترس نیست. ساخته شدن این تأسیسات از سوی شرکت‌ها و پیمانکاران گوناگون و نبود آگاهی از محل دفن دقیق این گونه ساختارها، طراحی و ساخت شبکه‌های جدید را مشکل و پیچیده می‌کند. از طرفی آگاهی از توزیع شبکه‌های تأسیساتی به منظور مدیریت شبکه و نیاز به تعمیر و نگهداری از شبکه‌های با طول عمر زیاد، تعیین محل دقیق این گونه ساختارها را بسیار پراهمیت ساخته است. در این راستا به منظور کاهش اختلالات ناشی از حفاری‌های بی‌مورد در مناطق شهری، روش‌های غیر مخرب مورد توجه بسیاری از مهندسان تأسیسات قرار گرفته است. در این میان روش GPR به منزله یکی از روش‌های نوین ژئوفیزیک کم‌عمق، موفقیت‌های قابل توجهی حاصل کرده و در سال‌های اخیر تحقیقات بسیاری در این خصوص در نقاط گوناگون دنیا دیده می‌شود. از جمله تحقیقات ارزشمند صورت گرفته در این زمینه می‌توان به پژوهش‌های ژنگ و مک‌مکان در ۱۹۹۷ اشاره کرد که با استفاده از شبیه‌سازی عددی پاسخ لوله‌ها و تانک‌های مدفون در زمین را در شرایط متفاوت بررسی کردند.

دستگاه‌های GPR با تولید و انتشار تپ‌های ناپیوسته الکترومغناطیسی در محیط تحت بررسی، ناپیوستگی‌های الکتریکی را آشکارسازی می‌کنند. شکل و پهنای نوار بسامد تپ GPR تابعی از مشخصات آنتن مورد استفاده برای تولید این تپ‌ها است. عموماً این آنتن‌ها را با توجه به بسامد مرکزی تپ تولید شده، نام‌گذاری می‌کنند. انتخاب آنتن‌ها برای برداشت، با در نظر گرفتن شرایط زیرسطحی، مشخصات هدف مورد بررسی (هندسه و ابعاد)، عمق نفوذ و تفکیک موردنظر تعیین می‌شود. زمانی که تپ الکترومغناطیسی گسیل شده از آنتن فرستنده به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می‌کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور می‌کند و بخشی بازتاب می‌شود. این امر ناشی از تغییر امپدانس (Impedance) امواج

۲ روش تحقیق

۱-۲ اندازه‌گیری روی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی این اندازه‌گیری روی خط اصلی انتقال فرآورده‌های نفتی ری-شاهرود صورت پذیرفت. این لوله فولادی که دارای قطر ۲۲ اینچی است، در قسمتی از مسیر خود از داخل دانشگاه صنعتی شاهرود عبور می‌کند. در این اندازه‌گیری، داده‌های GPR در یک شبکه منظم، به صورت ۴ نیم‌رخ موازی به طول‌های ۱۰ متر و به فاصله ۲ متر از یکدیگر، عمود بر امتداد لوله برداشت شدند. محل شبکه برداشت پیش‌گفته و همچنین امتداد تقریبی لوله در عکس هوایی منطقه برداشت، در شکل ۱ به نمایش درآمده است. نیم‌رخ‌های برداشت به ترتیب از سمت غرب به طرف شرق از صفر تا سه نام‌گذاری شده‌اند. لازم به ذکر است که جهت شمال در این شکل با علامت پیکان آبی‌رنگ نشان داده شده است. همچنین در شکل ۲ یک مقطع طرحواره-ای از ترانسه محل دفن لوله‌های حمل فرآورده‌های نفتی ری-شاهرود آورده شده است. داده‌های موردنیاز این بررسی از راه آنتن پوششی (Shielded) ۲۵۰ مگاهرتز دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شده‌اند.



شکل ۱. عکس هوایی منطقه برداشت به همراه نیم‌رخ‌های برداشت و امتداد تقریبی لوله (با تغییر از www.Googleearth.com).

که C_0 سرعت موج الکترومغناطیسی در هوا، و ϵ_r گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا است. اگر برخورد موج به فصل مشترک دو محیط ۱ و ۲ به صورت عمودی باشد، ضریب بازتاب با رابطه (۴) بیان می‌شود (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1}, \quad (4)$$

که z_1 و z_2 امپدانس الکترومغناطیسی موج در دو طرف فصل مشترک (در محیط‌های ۱ و ۲) است و با رابطه زیر بیان می‌شود (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$Z = \frac{\omega\mu}{(\omega^2\epsilon\mu + i\omega\mu\sigma)^{1/2}}, \quad (5)$$

که $i = \sqrt{-1}$ و σ رسانندگی محیط است. در شرایطی که رسانندگی ساختارهای مورد بررسی کم باشد و در غیاب مواد با تراوایی مغناطیسی زیاد، رابطه (۴) به صورت رابطه (۶) خلاصه می‌شود (رینولدز، ۱۹۹۷ و پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$R = \frac{\sqrt{\epsilon_{1r}} - \sqrt{\epsilon_{2r}}}{\sqrt{\epsilon_{1r}} + \sqrt{\epsilon_{2r}}}. \quad (6)$$

رابطه بالا در اکثر شرایط زمین‌شناختی با دقت خوبی، ضریب بازتاب را نشان می‌دهد. در جدول ۱ مشخصات الکترومغناطیسی چند نمونه از مواد مورد بررسی در این پژوهش آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات الکترومغناطیسی مواد (دیویس و آنان، ۱۹۹۴ - ژنگ و مک مکان، ۱۹۹۷).

نوع ماده	تراوایی نسبی ϵ_r	رسانندگی σ (mS/M)	سرعت V (M/nS)	میرایی (dB/M)
هوا	۱	۰	۰/۳۰	۰
آب شیرین	۸۰	۰/۵	۰/۰۳۳	۰/۱
فلز	۳۰۰	۱۰ ^{۱۰}	۰/۰۱۷	-
بتن	۴-۱۰	۱-۱۰	۰/۱	۲-۱۲
ماسه خشک	۳-۵	۰/۰۱	۰/۱۵	۰/۰۱
سیلت	۵-۳۰	۱-۱۰۰	۰/۰۷	۱-۱۰۰
رُس	۵-۴۰	۲-۱۰ ^۳	۰/۰۶	۱-۳۰۰

از آنجا که اعمال پردازش کوچ (Migration) تا اندازه‌های تفکیک داده‌ها را کاهش می‌دهد، برای نمایش بهتر جزئیات در مقطع‌های شکل ۳، از اعمال پردازش کوچ روی داده‌های GPR خودداری شده است. از این رو این بی‌هنجاری تاقدیسی شکل گسترده‌تر و پهن‌تر از اندازه واقعی خود دیده می‌شود (کری و بروکس، ۱۹۹۱). در مقطع‌های مزبور از واژه clay برای نمایش این بی‌هنجاری استفاده شده است. در شکل‌های ۳-ب و ۳-ج، یک بی‌هنجاری هذلولی شکل در زیر بی‌هنجاری تاقدیسی شکل به چشم می‌خورد. این هذلولی پاسخ لوله فلزی در این عمق است و از واژه pipe برای نمایش آن استفاده شده است. دنباله‌های این هذلولی به دلیل حضور نهشته‌های پر اتلاف رُسی در اطراف لوله به خوبی دیده نمی‌شود. در محل نیم‌رخ ۲ در شکل ۳-ج که ضخامت رسوبات رُسی در بالای لوله به کمترین مقدار می‌رسد، اثر لوله به نسبت از نیم‌رخ ۱ در شکل ۳-ب، واضح‌تر دیده می‌شود. در محل نیم‌رخ ۱ که میزان رسوبات ریزدانه در بالای لوله بیشتر از مقدار آن در محل نیم‌رخ ۲ است، اثر لوله فلزی با توان بازتاب بسیار زیاد و واقع در عمق ۱ متری به زحمت دیده می‌شود. این اثر ضعیف در شکل‌های ۳-الف و ۳-د، احتمالاً به علت افزایش میزان رسوبات دانه‌ریز در بالای لوله، اصلاً مشاهده نمی‌شود. این پدیده نشانگر استفاده از رسوبات ریزدانه (رُسی و سیلتی) برای محافظت لوله است. در صورتی که اگر از رسوبات ماسه‌ای برای محافظت لوله استفاده شده بود، به علت کم‌اتلاف بودن این گونه محیط‌ها نسبت به امواج (دیویس و آنان، ۱۹۸۹)، اثر لوله فلزی تشخیص‌پذیرتر می‌بود.

فلزات به دلیل داشتن گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی فوق‌العاده بالا، دارای توان بازتاب بسیار بالایی هستند. به این ترتیب که تقریباً تمام انرژی موج تابیده شده به سطح آنها بازتاب می‌شود. همچنین به دلیل عمق پوسته پایین امواج GPR در فلزات که ناشی از رسانندگی بالای

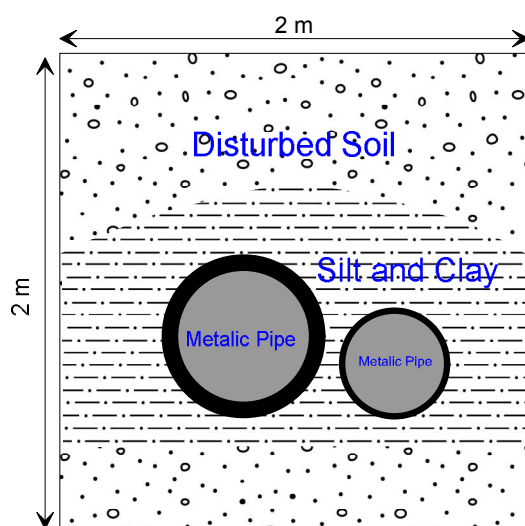
در شکل ۳، مقطع‌های عمقی داده‌های GPR با استفاده از سرعت ۰/۱۲ متر بر ثانیه برای ۴ نیم‌رخ مزبور نشان داده شده است. سرعت به دست آمده با استفاده از برآزش هذلولی‌های پراش روی مقطع‌های زمانی GPR به دست آمده است.

همه مقطع‌های عمقی GPR نشان داده شده در شکل ۳ با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC به ازای ضریب میرایی (Attenuation) ۳ و مقدار بیشینه بهره ۱۰۰ به دست آمده‌اند. همچنین برای حذف نوفه‌های بسامد زیاد از فیلتر پایین‌گذر به ازای بسامد قطع ۶۲۹ مگاهرتز، استفاده شده است. امواج GPR به سرعت در این محیط اتلاف می‌شوند، از این رو نسبت سیگنال به نوفه از پاسخ‌های ناشی از اهداف عمیق‌تر، کوچک است. اعمال بهره پیش‌گفته روی داده‌ها، نوفه‌ها (عموماً پراش‌ها (Spike)) را برجسته می‌کند. برای حذف این نوفه‌های بسامد زیاد از داده‌ها، از فیلتر پایین‌گذر استفاده شده است. در همه مقطع‌هایی که در شکل ۳ به نمایش درآمده‌اند، یک بی‌هنجاری قابل توجه تاقدیسی (سهمی) شکل در موقعیت ۴ متری از نیم‌رخ‌ها قابل تشخیص است. این بی‌هنجاری تاقدیسی شکل از آنجا که شباهت زیادی به هذلولی‌های پراش دارد، ممکن است به اشتباه، پاسخ ناشی از لوله فلزی در این عمق تفسیر شود. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، به منظور محافظت از لوله‌ها اطراف آنها را با مقدار زیادی رسوبات ریزدانه (عمدتاً رُسی و سیلتی) پوشانده‌اند. با توجه به قطر قابل توجه لوله‌ها (لوله بزرگ با قطر حدود ۵۵ سانتی‌متر) این رسوبات شکل تاقدیسی به خود گرفته‌اند. مشخصات الکتریکی رسوبات ریزدانه با خاک منطقه کاملاً متفاوت است (جدول ۱). از این رو مرز بارز این رسوبات با خاک سبب ایجاد یک بازتاب شاخص تاقدیسی شکل در مقطع‌های GPR شکل ۳ شده است. از طرفی لوله کوچک‌تر احتمالاً به علت ضخامت بیشتر رسوبات ریزدانه روی آن، آشکارسازی نشده است.

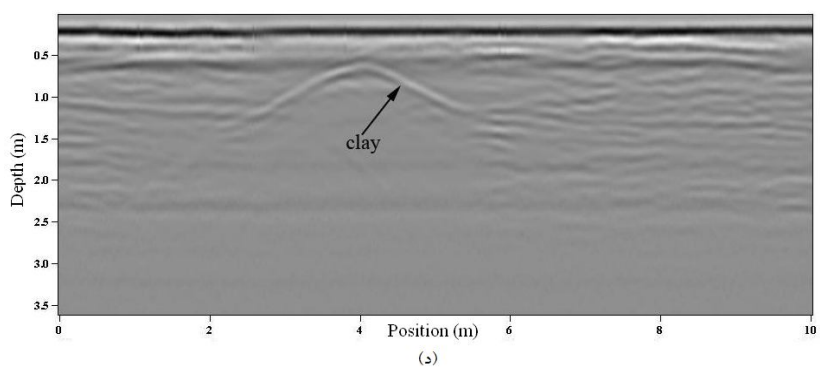
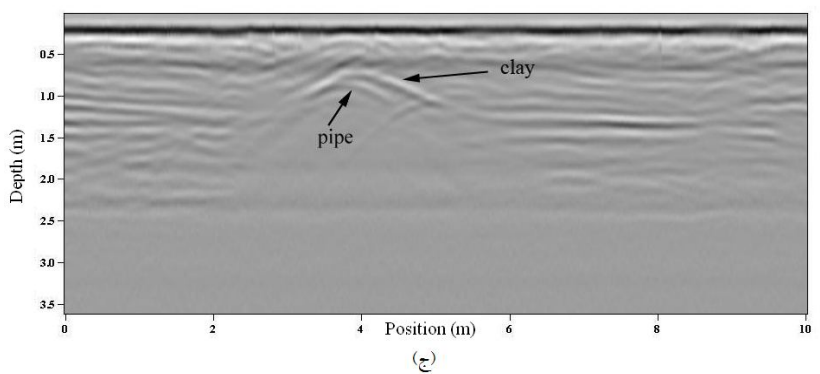
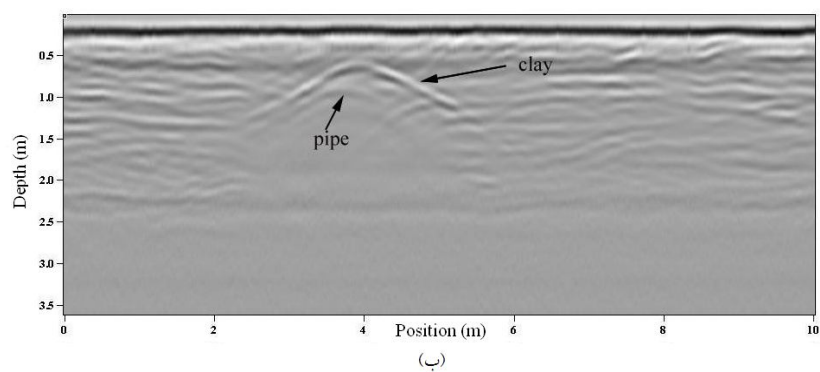
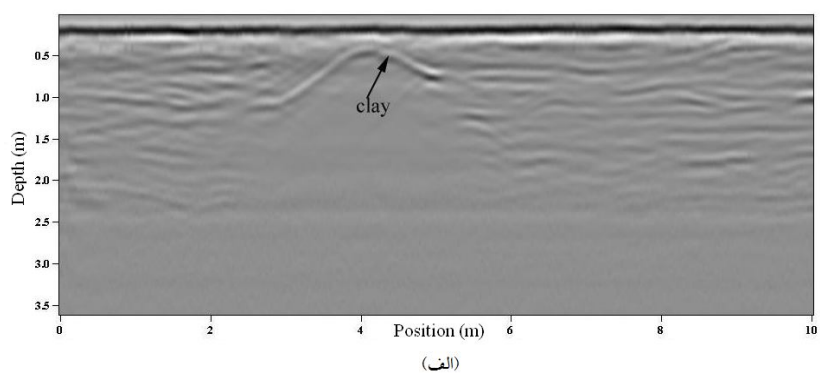
ریزدانه و همچنین رسوبات ریزدانه-لوله فلزی، از مواد با امپدانس الکترومغناطیسی زیاد عبور کرده و به مواد با امپدانس الکترومغناطیسی پایین رسیده است. برای نشان دادن کمی این مطلب با توجه به مشخصات الکتریکی مواد در جدول ۱، گذردهی نسبی خاک برابر ۷، گذردهی رسوبات ریزدانه روی لوله برابر مقدار میانگین ۱۵ و گذردهی لوله فلزی برابر ۳۰۰ در نظر گرفته می‌شود. همچنین با توجه به جدول ۱ و اندازه گیری‌های مقاومت ویژه در شکل ۶، مقاومت ویژه خاک، رسوبات ریزدانه و لوله فلزی به ترتیب برابر با ۳۰۰، ۵۰ و 10^{-7} اهم‌متر و تراوایی مغناطیسی نسبی آنها به ترتیب حدود ۱، ۱ و ۱۰۰ در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از این مقادیر، ضریب بازتاب در گذر از خاک به رسوبات ریزدانه با استفاده رابطه (۴) یا (۶) برابر با $0/189$ - به دست می‌آید. همچنین با محاسبه اندازه کمیت مختلط امپدانس الکترومغناطیسی برای رسوبات ریزدانه و لوله فلزی از رابطه (۵)، ضریب بازتاب در مرز آنها با استفاده از رابطه (۴) برابر با $0/997$ - خواهد بود. اندازه

آنهاست، این امواج در فواصل بسیار کوتاهی در آنها میرا می‌شوند و توانایی عبور از چنین ساختارهایی را ندارند (ژنگ و مک مکان، ۱۹۹۷). از این رو در مقطع‌های GPR مگر در شرایطی خاص (مثل حضور بازتاب‌های چندگانه و وجود نوفه‌هایی غیر از ساختارهای زیرسطحی)، هیچ‌گونه بازتابی پایین‌تر از سطح فلزات مشاهده نخواهد شد. به این ترتیب بی‌هنجاری تاق‌دیسی شکل که در تمام شکل‌های ۳-الف تا ۳-د قابل تشخیص است، نمی‌تواند اثر لوله فلزی در این عمق باشد.

در شکل ۴ یک رد (Trace) از نیم‌رخ ۲ در فاصله ۴/۳۵ متر از این نیم‌رخ به صورت مجزا نمایش داده شده است. اثر رسوبات رُسی و همچنین موجی که مستقیماً از طریق هوا به آنتن گیرنده رسیده، با واژه d.a.w مشخص شده است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، هر دو بازتاب دارای قطبیدگی منفی (معکوس قطبیدگی موج مستقیم هوایی) هستند. این پدیده از بازتاب موج از دو فصل مشترک با تغییر امپدانس الکترومغناطیسی از مقدار بزرگ‌تر به مقدار کوچک‌تر، ناشی شده است. امواج GPR در عبور از فصل مشترک‌های خاک-رسوبات



شکل ۲. مقطع طرحواره‌ای از ترانشه محل دفن لوله‌های انتقال فرآورده‌های نفتی ری-شاهرود.

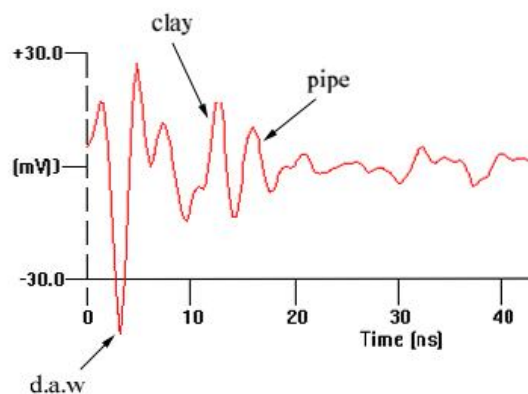


شکل ۳. مقطع عمقی نیم‌رخ‌های شبکه برداشت، با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین‌گذر، نیم‌رخ صفر (الف)، نیم‌رخ ۱ (ب)، نیم‌رخ ۲ (ج)، نیم‌رخ ۳ (د).

تفریق زمینه (Background subtraction) به منظور افزایش اثر شکل تاقدیسی شکل و هذلولی ناشی از لوله فلزی استفاده شده است. در نهایت به منظور انتقال رویدادهای شیب‌دار به مکان واقعی‌شان و همچنین تمرکز انرژی سیگنال پراشیده به نقطه‌ای که پراش امواج از آن صورت گرفته است، پردازش کوچ با استفاده از سرعت ۰/۱۲ متر بر ثانیه روی داده‌ها اعمال شده است.

مقطع‌هایی که در شکل ۵ به نمایش درآمده است، به صورت میانگین‌گیری قدر مطلق دامنه سیگنال به ازای هر ۴۵ سانتی‌متر، هستند. به این ترتیب به ازای هر ۴۵ سانتی‌متر از سطح زمین یک مقطع تهیه شده است. این مقطع‌ها از سطح زمین به طرف عمق از (الف) تا (و) نام‌گذاری شده‌اند. همان‌طور که در مقطع (الف) از شکل ۵ مشهود است، اثری از مسیر لوله در این عمق‌ها مشاهده نمی‌شود. مقطع (ب) از این شکل، میانگین دامنه سیگنال برای عمق‌های ۰/۴۵ تا ۰/۹ متر است. اثر لوله فلزی و همچنین بازتاب‌های ناشی از رسوبات رُسی اطراف لوله به صورت کاملاً مشخص در ۴ متری مقطع (ب) به خوبی دیده می‌شود. این بی‌هنجاری در شکل با پیکان مشخص شده است. منطقه اطراف ۴ متر در مقطع‌های (د) و (ه) دارای میانگین دامنه بسیار کم است و با رنگ آبی در این شکل‌ها مشخص می‌شود. این مناطق با میانگین دامنه کم در زیر بازتاب پیوسته ناشی از لوله و رسوبات اطراف آن دیده می‌شوند. این پدیده ناشی از توان بازتاب زیاد رسوبات رُسی و لوله فلزی و همچنین میزان اتلاف زیاد این نواحی است. مقطع (و) از شکل ۵ میانگین دامنه سیگنال برای عمق‌های ۲/۲۵ تا ۲/۷۰ متری را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، دامنه سیگنال بسیار کاهش یافته است و پاسخی از ساختارهای زیرسطحی در این عمق‌ها دیده نمی‌شود. این امر ناشی از عمق نفوذ محدود GPR در این منطقه است.

این اعداد نشان دهنده بزرگی ضریب بازتاب است و علامت منفی در این مقادیر نشان‌دهنده آن است که موج بازتابی در خلاف جهت موج اولیه است و به عبارتی ۱۸۰ درجه اختلاف فاز با آن دارد (تغییر قطبیت یا پلاریته). از آنجاکه این برداشت در مود TE صورت گرفته است، از این رو مؤلفه الکتریکی موج بازتابی در خلاف جهت مؤلفه الکتریکی موج اولیه است. مود TE حالتی است که مؤلفه الکتریکی موج الکترومغناطیسی (امتداد آنتن‌های GPR) موازی امتداد ساختارهای مورد مطالعه باشد. اگر از رسوبات ماسه‌ای برای حفاظت از لوله استفاده می‌شود، به دلیل رسانندگی و گذردهی دی‌الکتریک پایین این رسوبات در مقایسه با خاک‌های رُسی و ریزدانه، قطبیدگی موج بازتابی از سطح این مواد به این صورت دیده نمی‌شود.



شکل ۴. یک رد منفرد GPR در فاصله ۴/۳۵ متری از شکل ۳-ج.

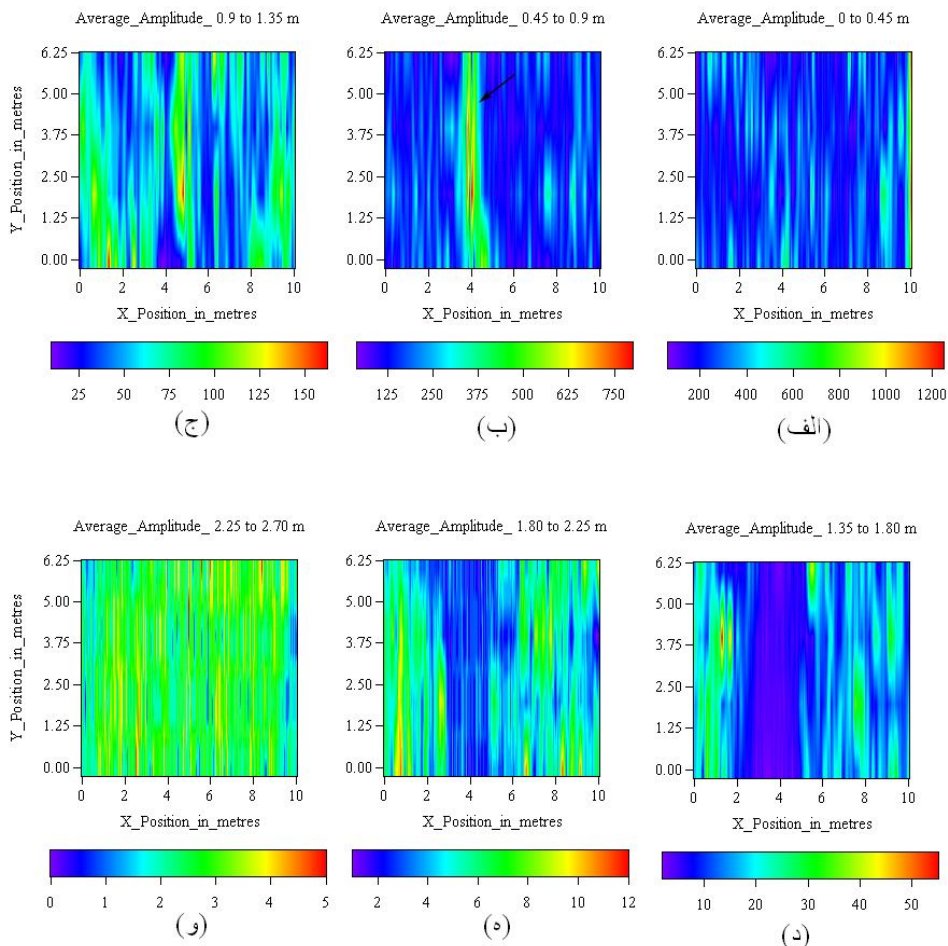
از آنجاکه اندازه‌گیری‌های GPR در این بررسی روی شبکه‌ای منظم صورت گرفت، نمایش داده‌های GPR به صورت سه‌بعدی نیز امکان‌پذیر است. در شکل ۵ مقطع‌های عمقی منطقه برداشت در افق‌های متفاوت عمقی به نمایش درآمده است. برای به دست آوردن این مقطع‌ها از پردازش‌های Dewow، میانگین پوش (Average envelope) به منظور یکسوسازی دامنه سیگنال‌ها، از فیلتر

۲-۲ اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه

به‌منظور تطبیق و بررسی نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های GPR، در محل نیم‌رخ صفر، اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه نیز صورت پذیرفته است. به‌منظور دستیابی به اطلاعات مربوط به عمق‌های بیشتر، طول نیم‌رخ مقاومت ویژه از نیم‌رخ GPR متناظر آن، بزرگ‌تر در نظر گرفته شد. برداشت‌های مقاومت ویژه به روش نیم‌رخ‌زنی با استفاده از آرایش ونر و به ازای فواصل میان‌الکترودی ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ متر صورت گرفته است.

در شکل ۶ نیم‌رخ‌های مقاومت ویژه ظاهری ونر به ازای فواصل میان‌الکترودی متفاوت به همراه مقطع دو بُعدی مقاومت ویژه حاصل از مدل‌سازی وارون این نیم‌رخ، نشان

داده شده است. لوله فلزی در فاصله ۱۳ تا ۱۴ متر از ابتدای نیم‌رخ واقع است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، نیم‌رخ‌های با فواصل میان‌الکترودی ۱، ۲ و ۳ متر، یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کم در محل دفن لوله فلزی آشکار می‌سازند. نیم‌رخ‌های با فاصله میان‌الکترودی ۴ و ۵ متر برخلاف نیم‌رخ‌های قبل، اثری از لوله فلزی نشان نمی‌دهند. این مسئله از عمق دفن کم لوله ناشی شده است. همان‌طور که از اندازه‌گیری‌های GPR در بخش قبل مشاهده شد، عمق دفن لوله کمتر از ۱ متر است. در مقطع دو بُعدی حاصل از مدل‌سازی وارون (شکل ۶-ب)، یک بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کم از ۱۲ تا ۱۴ متری



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

این محل، می‌تواند ناشی از حضور رسوبات ریزدانه اطراف لوله در طبقات پایینی خاک این ناحیه باشد.

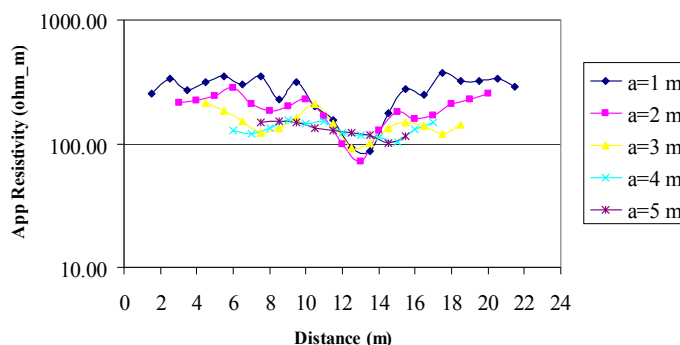
۳-۲ تأثیر رسانندگی محیط برداشت در اندازه‌گیری

داده‌ها، نوفه‌ها و تحلیل طیف بسامد

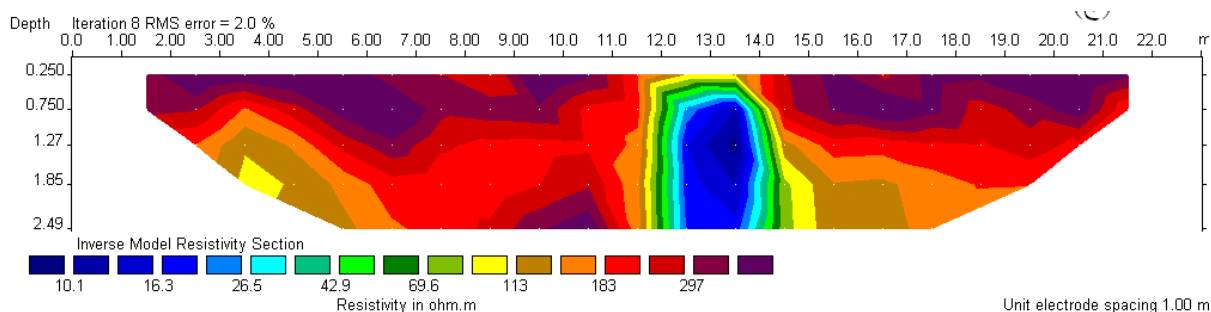
برای نمایش تأثیر نامطلوب رسانندگی محیط‌های تحت بررسی در اندازه‌گیری‌های GPR، یک نیم‌رخ GPR برای آشکارسازی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی در زمین‌های با رسانندگی الکتریکی زیاد در نظر گرفته شد. لوله انتقال فرآورده‌های نفتی در بخشی از مسیر خود از زمین چمن فوتبال دانشگاه صنعتی شاهرود می‌گذرد. لایه فوقانی خاک در این زمین چمن تا عمق تقریبی ۷۰ سانتی‌متر از خاک رُس تشکیل شده است. آبیاری متناوب زمین و

نیم‌رخ دیده می‌شود. این بی‌هنجاری منطبق بر ترانشه حفاری شده به منظور دفن لوله فلزی است. مقاومت ویژه کم این بی‌هنجاری ناشی از حضور رسوبات ریزدانه در اطراف لوله است. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کم به سمت نقطه‌ای در فاصله ۱۳ تا ۱۴ متر و در عمق ۱/۲۷ متر، همگرا می‌شود. این بی‌هنجاری با مقاومت ویژه کمتر می‌تواند ناشی از اثر لوله فلزی در این عمق باشد. این نتیجه با نتایج به دست آمده GPR در بخش قبل تطابق بسیار خوبی دارد. همان‌طور که در مقطع مدل‌سازی شده دیده می‌شود، بی‌هنجاری تا عمق ۲/۵ متر امتداد یافته است. بعید به نظر می‌رسد که زمین تا این عمق برای مدفون کردن لوله‌ای در عمق کمتر از ۱ متر، حفر شده باشد. از این رو کاهش مقاومت ویژه در عمق‌های بیشتر در

PIPE



(الف)



(ب)

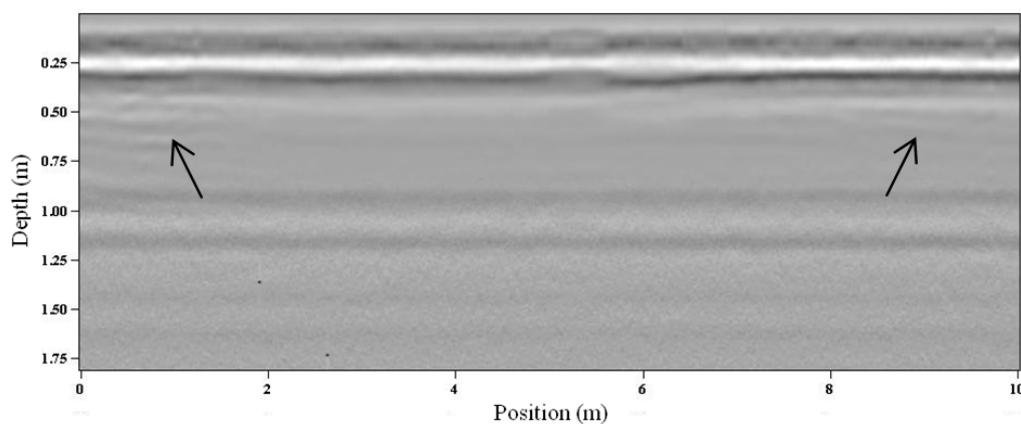
شکل ۶. نیم‌رخ‌های مقاومت ویژه ظاهری و نر به‌ازای فواصل میان‌الکترودی متفاوت روی لوله فلزی (الف) به همراه مقطع حاصل از مدل‌سازی وارون آن (ب).

در شکل ۸-الف میانگین طیف بسامد تپ‌های دریافتی در آنتن گیرنده، برای این نیم‌رخ به نمایش درآمده است. برای مقایسه با محیط‌های با رسانندگی الکتریکی کمتر، میانگین طیف بسامد دریافتی برای نیم‌رخ صفر از شبکه برداشت بخش قبل، در شکل ۸-ب به نمایش درآمده است. لازم به توضیح است که این طیف‌ها قبل از اعمال هیچ‌گونه پردازش و فیلتری روی داده‌ها به نمایش درآمده‌اند. از این رو مشخصه بسامد تپ‌های دریافتی حفظ شده و حاوی اطلاعات صحیحی از محیط زیرسطحی است.

در مقایسه طیف بسامد دو نیم‌رخ در شکل ۸، دو نکته کاملاً مشهود است. اولاً بسامد مرکزی در برداشت در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی زیاد (شکل ۸-الف) به مقادیر کمتری (در حدود ۱۷۰ مگاهرتز) منتقل شده است. در صورتی که طیف بسامد دریافتی برای نیم‌رخ صفر حدود ۲۵۰ مگاهرتز است. این پدیده ناشی از اتلاف بیشتر بسامدهای زیاد در این محیط است. به این ترتیب که بسامدهای زیاد موجود در تپ GPR در محیط‌های با رسانندگی الکتریکی زیاد، سریع‌تر اتلاف می‌شوند. پنجره زمانی در نظر گرفته شده برای این برداشت حدود ۷۰ نانوثانیه است. در چنین فاصله زمانی کوتاهی، قسمت

همچنین قابلیت زیاد رُس در نگهداری آب، رسانندگی زیاد این منطقه را سبب شده است. این نیم‌رخ، که در شکل ۱ با نماد Pg نشان داده شده و کاملاً از زمین چمن مزبور می‌گذرد، مشابه با ۴ نیم‌رخ بخش قبل، به طول ۱۰ متر و عمود روی لوله انتقال فرآورده‌های نفتی و در شرق و موازی با ۴ نیم‌رخ پیش‌گفته در نظر گرفته شد. فاصله این نیم‌رخ از نیم‌رخ ۳ که نزدیک‌ترین نیم‌رخ (در بین ۴ نیم‌رخ پیش‌گفته) به آن است، حدود ۱۰ متر است.

در شکل ۷ مقطع عمقی این نیم‌رخ به نمایش درآمده است. این مقطع با استفاده از سرعت ۰/۶ متر بر نانوثانیه (سرعت امواج GPR در رُس‌ها) و با استفاده از پردازش‌های Dewow و بهره SEC به دست آمده است. به علت اتلاف فوق‌العاده زیاد رس‌های مرطوب، هیچ اثری از لوله فلزی در شکل ۷ دیده نمی‌شود. دو خط موازی که در عمق‌های ۰/۹ و ۱/۲ متر در همه طول نیم‌رخ دیده می‌شوند، بی‌هنجاری ناشی از ساختارهای زیرسطحی نیست. این رویداد به مقدار ضعیف‌تری در همه مقطع‌های GPR که در این مقاله آورده شده، قابل تشخیص است. این پدیده به مشخصه‌های دستگاه مورد استفاده مربوط است و احتمالاً به علت استفاده از کابل‌های فلزی برای اتصال آنتن‌ها به کسول دستگاه به وجود آمده است (نیل، ۲۰۰۴).



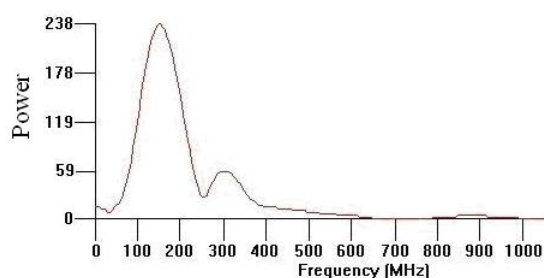
شکل ۷. مقطع عمقی داده‌های GPR در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی زیاد.

۲-۴ تفکیک ویژگی تأسیسات مدفون با توجه به

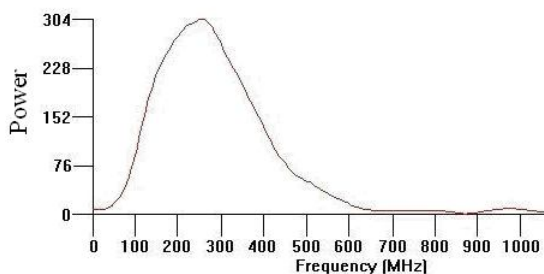
مشخصه‌های دامنه و فاز تپ‌های GPR

قابلیت روش GPR در تعیین مکان لوله‌های تأسیساتی، روی نیم‌رخ به طول ۱۶ متر در محوطه دانشگاه صنعتی شاهرود، در فاصله بین ساختمان تأسیسات دانشگاه و خوابگاه دانشجویی، مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۹ مقطع زمانی این نیم‌رخ که محور قائم آن زمان رفت (تابش) و برگشت (بازتاب) موج GPR است، نشان داده شده است. این مقطع با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC به‌ازای ضریب اتلاف ۳ و مقدار بیشینه بهره ۱۰۰ تهیه شده است. همچنین برای حذف نوفه‌های بسامد زیاد ناشی از اثر بهره مورد استفاده، از فیلتر پایین‌گذر با بسامد قطع ۶۲۸ مگاهرتز استفاده شده است. در شکل ۹ چند هذلولی پراش در نقاط متفاوت به چشم می‌خورد. اولین هذلولی در موقعیت تقریبی ۱/۵ متری نیم‌رخ واقع شده و نشان‌دهنده اثر کابل‌های برق مدفون در این ناحیه است. در این شکل از واژه cable برای نشان دادن این اثر استفاده شده است. در ۵ متری نیم‌رخ، کانال تأسیساتی واقع شده و دارای ابعاد تقریبی ۱ متر عرض و کمتر از ۲ متر ارتفاع است. سقف این کانال در عمق تقریبی ۰/۸ متر از سطح زمین واقع است. این کانال برای عبور لوله‌های تأسیساتی تعبیه شده است و دو لوله فلزی به قطرهای ۶ و ۸ اینچ، از سمت چپ آن عبور می‌کنند. این لوله‌ها در مجاورت یکدیگر واقع شده و درون کانال هوا قرار گرفته‌اند. به علت سرعت زیاد امواج در هوا و به‌واسطه آن تفکیک کم GPR در این محیط، پاسخ‌های ناشی از این دو لوله به‌صورت یک هذلولی دیده می‌شود. این هذلولی که در فاصله ۵ متری نیم‌رخ از حرف pipe برای نمایش آن استفاده شده است، پاسخ ناشی از لوله‌های فلزی درون این کانال است. مجموعه‌ای از بازتاب‌های متوالی در محل کانال تأسیساتی قابل تشخیص است. این بازتاب‌ها ناشی از بازآوایش امواج درون کانال است و از واژه reverberation برای

قابل توجهی از بسامدهای زیاد موجود در تپ حذف شده است. این مطلب تأکیدی بر رسانندگی شدید محیط زیرسطحی است. پدیده دیگری که در میانگین طیف بسامد شکل ۸-الف دیده می‌شود، یک قله جزئی در بسامد ۳۰۰ مگاهرتز است. این اثر احتمالاً ناشی از رینگ شدن (Ringing) تپ‌های GPR به‌واسطه حضور رُس‌های مرطوب سطح زمین است. زمانی که تپ GPR بین آنتن‌ها و یک منطقه با رسانندگی الکتریکی زیاد به تناوب بازتاب شود، این نوفه پدیدار می‌شود (نیل، ۲۰۰۴). بی‌هنجاری‌های مشاهده شده در ابتدا و انتهای نیم‌رخ در شکل ۷ که به‌صورت یک‌سری تپ‌های متوالی به زحمت قابل تشخیص‌اند و با پیکان در این مکان‌ها مشخص شده‌اند، ناشی از این پدیده هستند. از آنجاکه این نوفه دارای بسامدی متفاوت با بسامد سیگنال‌ها است، با انتخاب فیلتری مناسب در حوزه بسامد، از پاسخ‌های زیرسطحی تفکیک پذیر است.



(الف)



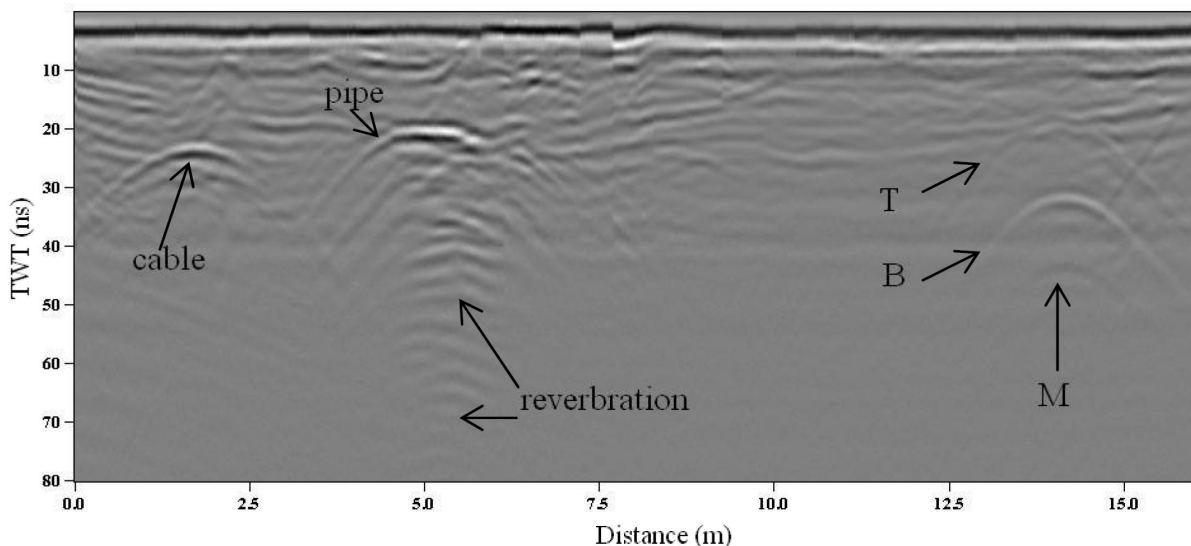
(ب)

شکل ۸ میانگین طیف بسامد بازگشتی برای برداشت در خاک‌های با رسانندگی الکتریکی زیاد (الف) و نیم‌رخ صفر (ب).

M برای نمایش آن استفاده می‌شود. علت وجود چنین فاصله زمانی بین این پاسخ‌ها، سرعت فوق‌العاده کم امواج GPR درون آب است. همان‌طور که در شکل ۹ دیده می‌شود، فواصل زمانی بین این هذلولی‌ها حدود ۱۲ تا ۱۳ نانوثانیه است. با توجه به سرعت امواج GPR در آب (۰/۳۳ متر بر نانوثانیه) و با استفاده از رابطه (۱) قطر این لوله حدود ۲۰ تا ۲۱/۵ سانتی‌متر برآورد می‌شود. این نتیجه تطابق خوبی با نتیجه واقعی (قطر ۸ اینچی لوله) دارد. فلزات دارای گذردهی دی‌الکتریک و رسانندگی بسیار بیشتری نسبت به مواد تشکیل‌دهنده پوسته زمین هستند (ژنگ و مک مکان، ۱۹۹۷ و تلفورد و همکاران، ۱۹۹۸). همان‌طور که در مقطع زمانی شکل ۹ دیده می‌شود، لوله‌ها و کابل‌های فلزی، بازتاب‌های بارزتری نسبت به لوله آزیستی نشان می‌دهند. با توجه به رسانندگی زیاد فلزات، عمق پوسته امواج GPR در آنها بسیار کم است. از این رو این امواج به سرعت در آنها اتلاف می‌شود. به همین علت هیچ بازتابی از قسمت تحتانی لوله‌های فلزی در مقطع‌های GPR دیده نمی‌شود.

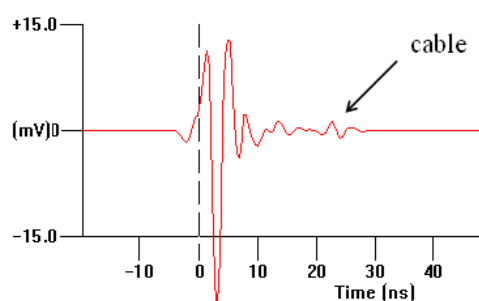
نمایش آن استفاده شده است. ابعاد کانال در مقایسه با طول موج بسامد مرکزی آنتن مورد استفاده در هوا (حدود ۱/۲ متر)، قابل توجه است. از این رو مشاهده چنین پدیده‌ای در این مکان را می‌توان انتظار داشت.

سه هذلولی متوالی در ۱۴ متری نیم‌رخ که رأس آنها به ترتیب در زمان‌های ۱۹، ۳۲ و ۴۴ نانوثانیه واقع شده، قابل تشخیص است. در نگاه اول ممکن است این هذلولی‌ها را ناشی از چند فصل مشترک متفاوت تفسیر کنیم. در صورتی که مسبب این هذلولی‌ها، وجود لوله آب آشامیدنی به قطر ۸ اینچ و از جنس آزیست است که در عمق تقریبی ۱ متری در این محل مدفون است. اختلاف زیاد در گذردهی خاک و آب شیرین و همچنین اتلاف (میرایی) کم امواج در آب آشامیدنی، چنین بازتاب‌هایی را سبب شده است. هذلولی اول که از حرف T برای نمایش آن استفاده شده، پاسخ ناشی از قسمت فوقانی لوله است. هذلولی دوم، بازتاب ناشی از قسمت تحتانی لوله است و از حرف B برای نمایش آن استفاده شده است. هذلولی سوم که اولین بازتاب درونی (چندگانه (Multiple)) لوله است، خیلی ضعیف‌تر است و از حرف

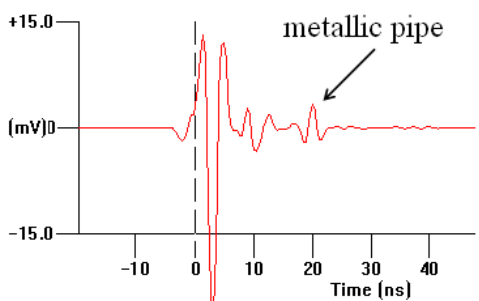


شکل ۹. مقطع زمانی نیم‌رخ GPR با اعمال فیلتر Dewow، بهره SEC و فیلتر پایین‌گذر.

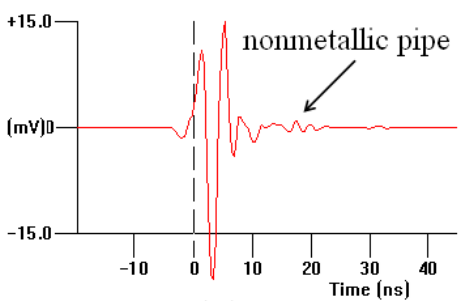
هدف‌های معمول در آشکارسازی با GPR است. ولی همان‌طور که دیده می‌شود، بازتاب ناشی از لوله آزیستی حاوی آب در مقایسه با بازتاب‌های ناشی از ساختارهای فلزی در شکل‌های ۱۰-الف و ۱۰-ب بسیار ضعیف‌تر است. این مسئله ناشی از توان زیاد فلزات در بازتاب امواج است، چراکه تقریباً همه انرژی امواج در برخورد با آنها بازتاب می‌یابد. مسئله قابل توجه دیگر در شکل ۱۰-ب، قطبیدگی (Polarity) معکوس تب بازتابی از لوله فلزی با



d.a.w (الف)



(ب)



(ج)

شکل ۱۰. نمایش ردهای مجزا روی کابل‌های فلزی (الف)، لوله فلزی (ب) و لوله آزیستی حاوی آب (ج).

برای نشان دادن قابلیت GPR در تفکیک جنس ساختارهای زیرسطحی ردهای برداشتی در فواصل ۱/۷، ۵/۱ و ۱۴/۲ متری از نیم‌رخ شکل ۹، به صورت مجزا بررسی می‌شود. این ردها در شکل ۱۰ نشان داده شده و به ترتیب منطبق بر محل دفن کابل‌های برق، لوله فلزی و لوله آزیستی هستند. این ردها قبل از اعمال هرگونه پردازشی روی داده‌ها به دست آمده‌اند و فقط برای کاهش اثر اشباع سیگنال در آنتن گیرنده، از فیلتر بالاگذر dewow استفاده شده است. لذا می‌توان انتظار داشت که فقط ساختارهای زیرسطحی باعث فیلتر شدن این ردها شده باشند. از این رو رویدادهای ثبت شده در ردها، عاری از هرگونه تغییرات احتمالی در مشخصه‌های تب دریافتی (اعم از دامنه، بسامد و فاز) به واسطه اعمال پردازش‌ها هستند. به این ترتیب تحلیل دامنه و فاز این بی‌هنجاری‌ها با احتیاط زیاد، امکان پذیر است. تب GPR در عبور از ساختارهای زیرسطحی به واسطه پخش هندسی و اتلاف ناشی از رسانندگی الکتریکی محیط‌های زیرسطحی و همچنین فیلتر شدن به واسطه عبور از فصل مشترک‌های زیرسطحی، دستخوش تغییرات زیادی می‌شود (تورنر، ۱۹۹۴). از این رو تحلیل مشخصه تب‌های دریافتی به خصوص تحلیل فاز آنها مشکلات بسیاری را به همراه دارد. از آنجا که اطلاعات ارزشمندی از این مشخصات قابل دستیابی است، به نظر می‌رسد که تحقیقات آتی GPR بر مبنای این اصول پایه‌ریزی شوند.

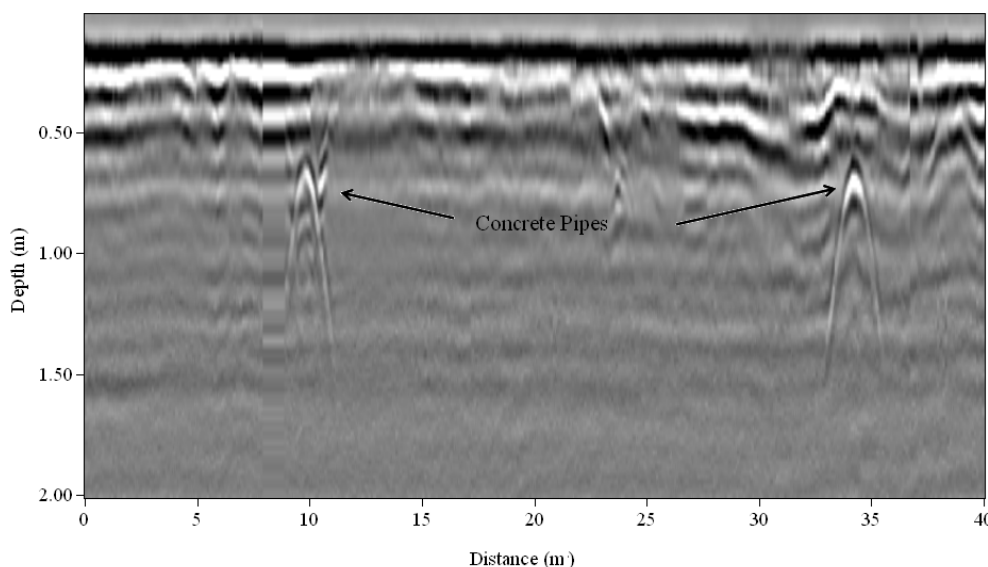
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص شده است، اثر مربوط به لوله فلزی به صورت یک تب با دامنه زیاد در شکل ۱۰-ب دیده می‌شود. این مسئله حتی در خصوص کابل‌های فلزی که در عمق بیشتری از لوله انتقال آب واقع شده‌اند نیز به خوبی قابل تشخیص است. این امر از تباین (Contrast) زیاد امپدانس الکترومغناطیسی فلزات با محیط‌های زیرسطحی، ناشی شده است. آب آشامیدنی نیز به علت تباین زیاد در مشخصات الکترومغناطیسی یکی از

که در محل دفن لوله حاوی آب در شکل ۹، سه هذلولی متوالی قابل تشخیص است. هر چند تپ‌های GPR در برخورد با فصل مشترک‌های فوقانی و تحتانی لوله حاوی هوا بازتاب و در گیرنده دستگاه دریافت می‌شوند، ولی به علت سرعت زیاد امواج الکترومغناطیسی در هوا، این رویدادها از نظر زمانی بسیار نزدیک هم هستند. از آنجاکه پاسخ ناشی از فصل مشترک‌های پیش گفته دارای فطییدگی متفاوتی است، این پاسخ‌ها با یکدیگر دارای تداخل مخرب هستند. از این رو پاسخ ناشی از فصل مشترک‌های مزبور، قابل تفکیک نیست و در محل دفن هر یک از لوله‌ها (۹ و ۳۴ متری نیم‌رخ) فقط یک هذلولی قابل تشخیص است.

۳ بحث و نتیجه‌گیری

روش GPR ابزاری مناسب برای آشکارسازی لوله‌های تأسیساتی و کابل‌های ارتباطی مدفون در خاک است. در مناطق شهری استفاده از اغلب روش‌های ژئوفیزیکی به

موج مستقیم است. به عبارت دیگر این تپ‌ها دارای ۱۸۰ درجه اختلاف فازند. این مسئله ناشی از عبور امواج از یک محیط با امپدانس الکترومغناطیسی زیاد (هوا) به محیط با امپدانس الکترومغناطیسی کم (فلز) است. برای بررسی اثر شارح محتوی لوله‌ها در اندازه‌گیری‌های GPR، یک نیم‌رخ به طول ۴۰ متر روی دو لوله غیرفلزی برداشت شد. مقطع عمقی این نیم‌رخ با استفاده از سرعت ۰/۱ متر بر نانو ثانیه در شکل ۱۱ به نمایش در آمده است. لوله‌های مورد بررسی از جنس بتون و دارای قطر تقریبی ۴۰ سانتی‌متر هستند. این لوله‌ها که به منظور انتقال آب به زمین‌های کشاورزی در منطقه‌ای در اطراف شاهرود تعبیه شده‌اند، در هنگام برداشت داده‌ها فاقد آب بوده‌اند. همچنین عمق دفن آنها حدود ۶۰ سانتی‌متر از سطح زمین است. همان‌طور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود، در محل دفن لوله‌های بتونی در فاصله ۹ و ۳۴ متری نیم‌رخ فقط یک هذلولی قابل تشخیص است. با اینکه لوله‌ها غیرفلزی هستند و قطر قابل توجهی دارند، پاسخ کف لوله‌ها در مقطع عمقی GPR قابل مشاهده نیست. این مسئله از سرعت زیاد امواج GPR در هوا ناشی شده است. این در صورتی است



شکل ۱۱. مقطع عمقی داده‌های GPR روی لوله‌های غیرفلزی با اعمال فیلتر Dewow و بهره‌خودکار.

به‌واسطه آن سرعت امواج در محیط‌های زیرسطحی است. از این رو پاسخ‌های ناشی از قسمت‌های فوقانی و تحتانی لوله‌های غیرفلزی (آزبستی) انتقال آب، در مقطع‌های GPR به‌خوبی قابل تفکیک هستند. همچنین سرعت کم امواج در آب امکان اندازه‌گیری قطر لوله را با دقت خوبی فراهم آورده است. در چنین شرایطی در صورتی که قطر لوله‌های غیرفلزی مشخص باشد، با محاسبه سرعت از روی فاصله زمانی بین پاسخ‌ها، حتی تشخیص نوع شاره محتوی لوله‌ها نیز امکان‌پذیر است.

تشکر و قدردانی

نگارندگان لازم می‌دانند که از آقایان دکتر محسن اویسی مؤخر و دکتر ایرج پیروز، استادیاران محترم دانشگاه رازی کرمانشاه و دانشگاه صنعتی شاهرود به‌خاطر راهنمایی‌های ارزنده‌شان، تشکر ویژه کنند. همچنین از آقای مهندس محمد کبیریان، کارشناس محترم آزمایشگاه‌های ژئوفیزیک اکتشافی دانشگاه صنعتی شاهرود و نیز آقایان مهندس محسن جهانبین، مهندس محسن محمودی و مهندس علی جعفری به‌خاطر کمک در برداشت داده‌های موردنیاز این تحقیق، بی‌نهایت قدردانی می‌شود. در پایان لازم است از معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی شاهرود به‌خاطر حمایت‌های مالی از این تحقیق در قالب طرح پژوهشی پایان‌نامه کارشناسی ارشد، سپاسگزاری شود.

منابع

- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989, Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: *Geophysical Prospect.*, **37**, 531-551.
- Kearey, P., and Brooks, M., 1991, *An Introduction to Geophysical Exploration*: Blackwell Science, Oxford.
- Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress: *Earth-Science Reviews*, **66**, 261-330.

علت وجود محدودیت‌های مکانی و نوفه‌های محیطی با مشکلاتی همراه است. از این رو با استفاده از آنتن‌های پوششی GPR و بدون داشتن اثرات نامطلوب در محیط برداشت، به‌راحتی می‌توان چنین هدف‌هایی را آشکارسازی کرد. از طرفی سرعت زیاد برداشت داده‌ها به‌صورت نیم‌رخ‌زنی پیوسته، امکان برداشت، پردازش و تفسیر سه‌بعدی ساختارهای زیرسطحی را به‌سہولت فراهم می‌سازد. از آنجا که مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی نقش مهمی را در نفوذ امواج GPR ایفا می‌کند، روش مقاومت ویژه را می‌توان به‌مثابه روشی ساده و مناسب در کمک به تفسیر مقطع‌های GPR به کار برد. میزان اتلاف بسامدهای موجود در تپ GPR تابعی از مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی است. از این رو با تحلیل طیف بسامد تپ‌های دریافتی می‌توان برآوردی از مقاومت ویژه ساختارهای زیرسطحی به‌دست آورد. همچنین نوفه‌های موجود در مقطع‌های GPR ممکن است به‌اشتباه پاسخ ناشی از ساختارهای زیرسطحی تفسیر شوند. با تحلیل این طیف، نوفه‌هایی که دارای بسامدی متفاوت از سیگنال‌ها هستند، قابل شناسایی و تفکیک از پاسخ اهداف زیرسطحی هستند.

تباین در هریک از مشخصات الکترومغناطیسی (به‌ویژه رسانندگی الکتریکی و گذردهی دی‌الکتریک) سبب آشکارسازی اهداف زیرسطحی می‌شود. از این رو GPR حتی در آشکارسازی لوله‌های غیرفلزی و کانال‌های زیرسطحی موفق بوده است. با تحلیل مشخصه‌های دامنه و فاز تپ‌های GPR، تفکیک جنس لوله‌های فلزی و غیرفلزی به‌واسطه ضریب بازتاب زیاد فلزات و همچنین تغییرات فاز تپ بازتابی، امکان‌پذیر است. از آنجا که این مشخصه‌ها حاوی اطلاعات قابل‌توجهی از ساختارهای زیرسطحی هستند، تحلیل کمی آنها می‌تواند اساس مدل‌سازی کمی داده‌های GPR در پژوهش‌های آتی باشد. قدرت تفکیک روش GPR تابعی از طول موج و

- Turner, G., 1994, Subsurface radar propagation deconvolution: *Geophysics*, **59**(2), 215-223.
- Van Overmeeren, R. A., 1994, Georadar for hydrogeology: *First Break*, **12**(8), 401-408.
www.Googleearth.com
- Zeng, X., and McMechan, G. A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes: *Geophysics*, **62**(3), 797-806.
- Parasnis, D. S., 1997, *Principles of Applied Geophysics*: Chapman and Hall.
- Reynolds, J. M., 1997, *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*: John Wiley & Sons, Chichester.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., and Sheriff, R. E., 1998, *Applied geophysics*: Cambridge University Press.