

بررسی اثر بسامد مرکزی آنتن و کاربرد پارامترهای پردازشی در مکان‌یابی تاسیسات شهری مدفون به روش GPR

سجاد قنبری^۱ و محمدکاظم حفیظی^{۲*}

^۱موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۲/۱۴، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۲/۱۱)

چکیده

به منظور ارزیابی روش GPR در حکم روشی غیر مخرب و سریع برای مکان‌یابی تاسیسات زیرسطحی، یک بررسی عملی در تونل نیایش تهران صورت پذیرفت. برای به دست آمدن نتایج مناسب، هم‌زمان از چند آنتن به‌منزله روش سخت‌افزاری و به کارگیری الگوریتم پردازشی در حکم روش نرم‌افزاری استفاده شد. آنتن‌های به کار گرفته شده، دارای بسامدهای ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ مگاهرتز هستند.

در رادارگرام‌های به دست آمده، به‌سختی نشانه‌هایی از اهداف مورد نظر دیده می‌شد. از این رو با استفاده از روندهای پردازشی مربوط به هر آنتن، کیفیت مقاطع تا حد مطلوبی افزایش یافت. رادارگرام آنتن ۲۵۰ مگاهرتز کارایی و کیفیت بالاتری داشتند، به‌گونه‌ای که بسیاری از تاسیسات در این مقطع به خوبی پدیدار شدند.

تحلیل سرعت به روش هذلولی پراش بوده است. با وجود اینکه در مورد تعیین نوع لوله‌ها و کابل‌های مدفون در تحقیقات ژئورادار هنوز باید بررسی‌های بسیاری صورت بپذیرد، اما در این تحقیق با توجه به شرایط خاص تاسیسات، تلاش‌هایی برای تعیین نوع بی‌هنجاری و تفسیر کامل رادارگرام انجام شده است. در نهایت نتایج به دست آمده از پردازش و تفسیر داده‌های رادار در مقایسه با واقعیت زمین پس از حفاری، بسیار رضایت‌بخش بوده‌است و می‌توان از مزایای روش ژئورادار در تحقیقات عمرانی مشابه بهره گرفت.

واژه‌های کلیدی: آنتن‌های GPR، پردازش، تاسیسات مدفون، تفسیر رادارگرام، ژئورادار

The effect of antenna central frequency and application of advanced processing in locating buried urban utilities by GPR method

Sajjad Ghanbari¹ and Mohammad kazem Hafizi^{2*}

¹Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 4 March 2012, accepted: 1 May 2013)

Summary

Creating new routes for underground cables or intubation, keeping the subsurface utilities and protecting them during the excavation and building requires a thorough knowledge of the exact location of subsurface utilities. Overall good results in GPR closely depends on some factors such as soil type, anomaly properties, survey design and proper selection of antenna. Finally, applying the appropriate processing parameters in accordance with the conditions, soil type and anomaly properties will be out of control and therefore, two other factors i.e. survey design and application of advanced processing parameters will be more important.

*Corresponding author:

hafizi@ut.ac.ir

*نگارنده رابط:

In survey design, the selection of survey methods such as CMP, 1D or 2D and the appropriate antenna are the main factors influencing the necessary resolution. GPR processing must be performed according to the specific conditions of each study. Since applying appropriate processing parameters can be useful, improper handling can be misleading.

In order to locate buried water pipes and telecommunication cables, a GPR survey was applied to Niayesh Tunnel in Tehran. In primary sections, the pipes were not visible appropriately. The most important factor in hardware methods is choosing the correct antenna according to the site conditions and the studied depth. Appropriate processing methods are used in GPR sections as software in order to increase the signal-to-noise ratio for locating the target. According to this issue, we used central frequency shielded antennas (500 MHz, 250 MHz and 100 MHz). Then an advanced processing algorithm including several filters and recorreption parameters was applied. The velocity analysis was done according to the diffraction hyperbola method. In this study, it was attempted to determine the type of the buried anomalies and utilities. However, more research is needed to determine the pipe type of the buried utilities in a GPR survey. Finally, the results of the processing and interpretation of radar data were compared to the real conditions of underground properties. This research will be useful for future GPR work in similar civil excavation projects.

Keywords: Buried utilities, georadar, GPR antenna, processing, radargram interpretation

۱ مقدمه

انتخاب آنتن با توجه به حد تفکیک هر آنتن، اهمیت زیادی دارد. پردازش در GPR باید با توجه به شرایط ویژه هر تحقیق انجام پذیرد؛ چراکه به همان اندازه که به کارگیری پارامترهای پردازشی مناسب ممکن است مفید باشد؛ پردازش نامناسب می تواند گمراه کننده باشد.

ایجاد مسیرهای جدید برای کابل و یا لوله گذاری در زیرزمین و همچنین نگهداری از تاسیسات زیرسطحی و محافظت از آن، هنگام عملیات خاکبرداری و ساخت و ساز، نیازمند داشتن آگاهی کامل از محل دقیق تاسیسات زیرسطحی است. توانایی GPR با توجه به وضوح رادارگرامها، باعث شده است که این روش به منزله روشی با دقت زیاد، در مکان‌هایی مانند خیابان‌های پُر تردد و یا سازه‌های عظیم به کار رود (وستردل و همکاران، ۱۹۹۲).

به دلیل آسیب نرساندن به تاسیسات شهری و مجموعه‌های باستانی، GPR روشی مطمئن برای استفاده در محیط‌های شهری، به شمار می آید (گامبا و لوسانی، ۲۰۰۰).

رادار نفوذی زمین روشی ژئوفیزیکی بر پایه انتشار امواج الکترومغناطیسی است که درحکم روشی غیرمخرب برای به تصویر در آوردن لایه‌ها و بی‌هنجاری‌های زیرسطحی به کار می‌رود (کانیرز، ۲۰۰۴؛ دانلیز، ۲۰۰۴). این روش به سرعت به‌منزله یک روش قابل‌اعتماد در زمینه‌های مهندسی عمران، باستان‌شناسی و کاربردهای دیگر شناخته شده است (لینفورد، ۲۰۰۶).

به‌طور کلی موفقیت در روش GPR، به عواملی همچون جنس خاک منطقه، نوع بی‌هنجاری و هدف مورد بررسی، طراحی صحیح عملیات برداشت و انتخاب درست آنتن و درنهایت به کارگیری پارامترهای پردازشی مناسب وابسته است. دو عامل خاک محل برداشت و هدف مورد بررسی، عوامل خارج از کنترل هستند. از این رو اهمیت دو عامل طراحی عملیات و انتخاب روند پردازشی مناسب دوچندان می‌شود. در طراحی عملیات برداشت، توجه به هندسه و جنس هدف مورد اکتشاف لازم است. برای تعیین برداشت دو یا سه‌بعدی یا نوع روش برداشت،

خواهد شد. اگر نوارهای بسامدی، با توجه به عمق و چگونگی اهداف مورد بررسی، به درستی انتخاب شوند و برای یک بررسی موردی از چندین آنتن با بسامدهای مرکزی متفاوت استفاده شود، آن‌گاه تفسیر حاصل از هماهنگی میان نیم‌رخ‌ها، دارای صحت و اعتماد بیشتری است.

در این تحقیق موردی، آنتن‌هایی با بسامدهای مرکزی متفاوت به کار گرفته شده‌است. همچنین روند پردازشی هر آنتن با توجه به شرایط اهداف مورد بررسی اعمال شده است. در نهایت مقطع به دست آمده، کیفیت بسیار بهتری نسبت به مقطع ابتدایی دارد و توانایی روش ژئورادار در به تصویر کشیدن تاسیسات شهری به خوبی اثبات می‌شود.

۲ روش تحقیق

سرعت امواج الکترومغناطیسی در هر ماده‌ای به سرعت نور در خلا بستگی دارد. سرعت امواج الکترومغناطیسی در مواد گوناگون با رابطه زیر داده می‌شود (نیل، ۲۰۰۴):

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

که C_0 ، سرعت موج در هوا، σ ، رسانایی ویژه الکتریکی محیط، μ_r ، نشان‌دهنده تراوایی مغناطیسی نسبی و ϵ_r ، گذردهی نسبی محیط نسبت به هوا و ω ، بسامد زاویه‌ای موج GPR است.

اگر σ رسانایی ویژه الکتریکی محیط، ϵ ، ثابت دی‌الکتریک و μ تراوایی مغناطیسی باشد، برای بیشتر کاربردهای GPR، فرض ثابت بودن شکل نرده‌ای σ و ϵ و μ مناسب است و این فرض برای σ و ϵ اهمیت بیشتری دارد (نیل، ۲۰۰۴).

روش‌های گوناگونی مانند مهاجرت دوباره تصویر-موج (Image-wave remigration) برای محاسبه سرعت امواج GPR وجود دارد (آملیانویس، ۲۰۰۸). سرعت

بسیاری از تحقیقات صورت پذیرفته با آنتن‌هایی با بسامدهای کم (۴۰۰-۱۰۰ مگاهرتز) برای اکتشاف درزها و تاسیسات زیرسطحی و در عمق‌های کمتر از ۲۰ متر انجام پذیرفته است (دیپاریس، ۲۰۰۸). به‌طور کلی در تحقیقات ژئوفیزیکی به روش ژئورادار، باید به شیوه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری، نسبت سیگنال به نوفه را افزایش داد. مهم‌ترین عامل در شیوه‌های سخت‌افزاری، انتخاب صحیح آنتن با توجه به شرایط جایگاه برداشت و عمق مورد بررسی است. به کارگیری پردازش‌های مناسب هم روش نرم‌افزاری در راستای افزایش کیفیت رادارگرام‌ها است.

در این روش آنتن‌هایی با پهناهای نوار بسامدی متفاوت (۱۰-۲۰۰۰ مگاهرتز) به کار گرفته می‌شود. طیف بسامدی با نام بسامد مرکزی آنتن استفاده شده در برداشت مشخص می‌شود. بسامد مرکزی، هم عمق نفوذی موجک GPR و هم تفکیک پذیری زمانی و مکانی رادارگرام‌ها را معین می‌کند (گراسموک و همکاران، ۲۰۰۶). بنابراین چگونگی انتخاب آنتن، اصلی‌ترین عامل در برداشت‌های رادار به شمار می‌آید. برای مکان‌یابی بی‌هنجاری‌هایی با اندازه‌های متفاوت و طبیعتاً در عمق‌های گوناگون، یک سری از مقاطع رادار برداشت شده با آنتن‌های گوناگون لازم است (آدام دیوس و همکاران، ۲۰۰۸). در برخی از تحقیقات، به‌جای استفاده از چند آنتن با بسامدهای گوناگون، از روشی به نام ترکیب چندبسامدی (Multiple frequency compositing) استفاده می‌شود (اندرس و همکاران، ۲۰۰۴). اگرچه روش ترکیب به‌منزله روشی کم‌هزینه، می‌تواند تا حد مطلوبی موجب افزایش کیفیت و وضوح رادارگرام شود اما روش سخت‌افزاری استفاده از چند آنتن و سپس به کارگیری پردازش‌های خاص هر آنتن، مزیت‌های بیشتری از جمله کیفیت داده‌ها و وضوح بیشتر رادارگرام‌ها را دارد. این موضوع به یک تفسیر جامع برگرفته از چند رادارگرام با آنتن‌های گوناگون منجر

در مقطع زمانی رخ خواهد داد که در مرحله پردازش رادارگرامها باید تصحیح شود. از این رو برای آنتنهای ۵۰۰، ۲۵۰ و ۱۰۰ مگاهرتز و بادر نظر گرفتن میانگین سرعت ۰/۱ متر بر نانو ثانیه برای امواج رادار، حد تفکیک برابر با مقادیر ۵، ۱۰ و ۲۵ سانتی متر خواهد بود.

موفقیت روش GPR به توانایی مواد گوناگون در عبور دادن امواج رادار وابسته است. برخی از مواد مانند یخهای قطبی در مقابل این امواج همانند یک جسم شفاف عمل می کنند. مواد دیگری مانند رُس اشباع از آب و آب دریا به سبب جذب شدید و میرایی امواج، همانند یک جسم مات هستند.

عامل تعیین کننده در چگونگی عبور و بازتاب موج الکترومغناطیسی از مواد گوناگون، وابسته به میزان ثابت دی الکتریک آنها است. هرچقدر مقدار انرژی بازتابی بیشتر و از لحاظ مقدار ثابت دی الکتریک تباین بیشتری در مواد روی زمین وجود داشته باشد، وضوح بیشتری در مقاطع رادار حاصل خواهد شد.

در به تصویر کشیدن تاسیسات مدفون مناطق شهری به خاطر وجود نوفه های گوناگون این مناطق اهمیت به کارگیری پردازش های مناسب برای افزایش نسبت سیگنال به نوفه دوچندان می شود. همچنین آنتن های GPR، امواج الکترومغناطیسی را در هوا هم منتشر می کنند. این اتفاق برای آنتن های بدون حفاظ (unshielded) با بسامدهای مرکزی کمتر، بسیار متداول تر است. از این رو در بررسی تاسیسات شهری مدفون باید از آنتن های پوششی (shielded) استفاده کرد. برای از بین بردن امواج بازتابی و یا عبوری بین اجسام سطحی و هوا که نوفه به شمار می روند، تحقیقات گوناگونی صورت پذیرفته است. (رجوع کنید به وندرکراک و اسلوب، ۲۰۰۰؛ الاین دنیس و همکاران، ۲۰۰۹).

برای موقعیت یابی یک لوله یا کابل، باید در نیم رخی عمود بر راستای آن داده برداری کنیم. هنگامی که جهت

امواج رادار در سطوح زیر زمین را می توان از روی هدلولی های پراش به دست آورد (کایدکف، ۲۰۰۴). در بسیاری از دستگاه های تجاری امروزی هم از این روش برای محاسبه سرعت موج و تبدیل زمان رسید به عمق استفاده می شود.

عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی به مقاومت ویژه و گذردهی محیط انتشار و همچنین بسامد موج مورد استفاده وابسته است. هرچقدر مقاومت ویژه محیط انتشار بیشتر و بسامد موج کمتر باشد، عمق نفوذ افزایش می یابد. در عین حال، هنگامی که بسامد کاهش یابد، قدرت تفکیک عمومی کاهش می یابد.

عمق نفوذ (D) با مشخص بودن دو فاکتور تعیین می شود. ابتدا سرعت موج در ماده (V_m) که از رابطه (۱) محاسبه می شود؛ سپس زمان سیر موج در مسیر رفت و برگشت (T) که از نمایش گرافیکی سیگنال های GPR به دست می آید. موارد فوق به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$D = \frac{1}{2}(TV_m). \quad (2)$$

انرژی بازتاب شده که به آنتن گیرنده می رسد، حاصل برخورد امواج الکترومغناطیسی با یک نقطه خاص نیست. این انرژی از سطح مشخصی از بازتاب کننده به گیرنده رسیده است. قدرت تفکیک افقی با این پارامتر کنترل می شود. برای بسامدهای بیشتر، قدرت تفکیک افقی افزایش می یابد.

بهترین قدرت تفکیک عمودی ثبت شده در موارد کم اتلاف، مانند ماسه های خشک با استفاده از آنتن های بسامد زیاد بین ۲ تا ۸ سانتی متر است و در حالت کلی با ۰/۲۵ طول موج برآورد می شود (نیل، ۲۰۰۴).

اگر گسترش جانبی بازتاب کننده ای بزرگ تر از حد تفکیک باشد، شکل آن به خوبی به صورت هدلولی روی مقطع زمانی دیده می شود؛ در غیر این صورت پدیده پراش

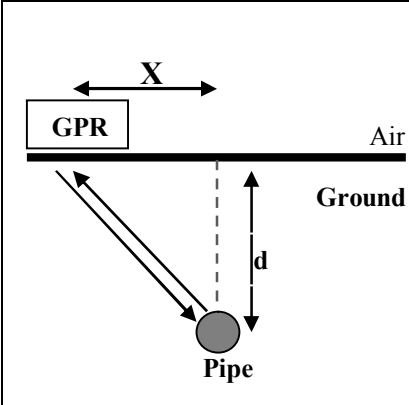
لوله‌ها و کابل‌های مورد بررسی را دید. شکل ۲ مقطع داده‌های خام را نشان می‌دهد.

نرم‌افزار مورد استفاده برای پردازش در این تحقیق، Reflexw(Registered) است. با استفاده از روش هذلولی پراش، براساس هذلولی نمایان شده در رادار گرام، هنگامی که آنتن به صورت عمود بر راستای جسمی مانند یک لوله می‌گذرد؛ با توجه به جدول ۱ خواهیم داشت:

$$T = \frac{1}{V} (2\sqrt{X^2 + d^2}) \quad \& \quad (T_0 = \frac{2d}{V}) \quad (3)$$

$$\rightarrow V = \sqrt{\frac{4X^2}{(T^2 - T_0^2)}}$$

جدول ۱. پارامترهای لازم در برآورد سرعت متوسط سیر امواج.

	پارامتر
	اندازه‌گیری
	T: زمان رفت و برگشت
	موج رادار
	d: فاصله عمودی شی تا سطح زمین
X: موقعیت آنتن GPR	

در بسیاری از نرم‌افزارها و دستگاه‌های GPR، با استفاده از برازش منحنی‌های سرعت و هذلولی‌های پدیدار شده در رادار گرام مقدار سرعت متوسط سیر موج رادار تعیین می‌شود. مقدار میانگین سرعت سیر امواج با استفاده از هذلولی‌های پراش و برای تبدیل زمان رسید به عمق، ۰/۱ متر بر نانو ثانیه محاسبه شده است.

هنگام برداشت داده‌ها، اگر اولین رویداد موج مستقیم که در هوا از فرستنده به گیرنده می‌رسد؛ تغییر موقعیت دهد، جابه‌جایی صفر زمانی رخ می‌دهد. این خطا نه فقط باعث جابه‌جایی اولین رویداد، بلکه باعث رانش همه رویدادها، از جمله رویدادهای بازتابی از مکان واقعی‌شان

قطبش میدان الکتریکی با محور طولی یک جسم موازی است، انتظار بازتاب‌ها و شکست‌هایی با دامنه‌های بزرگ وجود دارد. این موضوع نشان می‌دهد که جهت مناسب آنتن نسبت به بی‌هنجاری مورد بررسی می‌تواند اثرات بازتاب‌ها و شکست‌های بالای سطح زمین را به کمترین مقدار برساند (وندراک و اسلوب، ۲۰۰۰).

در مناطق شهری نوفه قابل توجهی به علت بازتاب امواج از دیوارها یا بازتابنده‌های وسیع نزدیک به نیم‌رخ‌های برداشت، به شکل لایه‌های بازتابی در رادار گرام‌ها پدیدار می‌شود. معمولاً تمایز میان پدیده‌های واقعی و مجازی به مقادیر سرعت آنها مربوط می‌شود. برای حذف پدیده‌های مجازی حاصل از بازتاب موج از اجسام سطحی، هذلولی‌هایی که سرعتشان حدود ۰/۳ متر بر نانو ثانیه باشد را باید حذف کرد (بانو و همکاران، ۱۹۹۹).

۲-۱ عملیات برداشت داده‌ها

برداشت داده‌ها در تونل نیایش (ملت) در شهر تهران، با دستگاه مالا (MALA) ساخت کشور سوئد، و با استفاده از سه آنتن پوششی با بسامدهای مرکزی ۵۰۰ مگاهرتز، ۲۵۰ مگاهرتز و ۱۰۰ مگاهرتز صورت گرفته است. برداشت‌ها به صورت تک‌فولد و از سوی شرکت زمین آب پی در نیم‌رخ‌هایی با طول یکسان و به طول تقریبی ۵۰ متر صورت پذیرفته است. نقشه محل برداشت داده‌ها، در شکل ۱ آمده است.

نخستین نیم‌رخ با استفاده از آنتن ۵۰۰ مگاهرتز به صورت هم‌راستا با امتداد تونل به طول تقریبی ۵۰ متر برداشت شد. در این حالت عمق نفوذ سیگنال در حدود یک متر است و بی‌هنجاری‌هایی که کمتر از این عمق باشند در مقطع رادار پدیدار خواهند شد. با نگاه دقیق بر رادار گرام به دست آمده، به سختی می‌توان نشانه‌هایی از



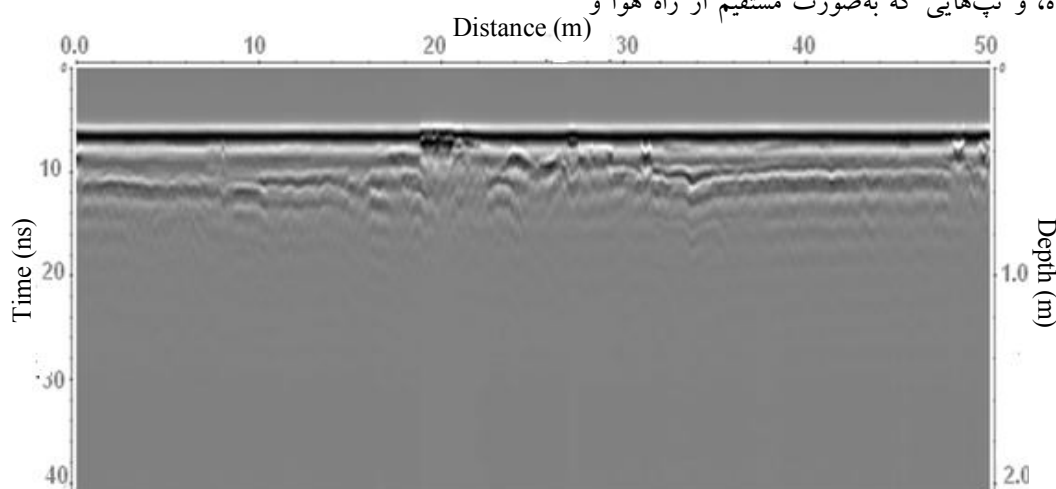
شکل ۱. موقعیت و محل برداشت داده‌ها در شهر تهران.

زمین به گیرنده می‌رسند و همچنین وجود بازتاب‌هایی که از توده‌های کم عمق نشأت می‌گیرند، گیرنده از سیگنال اشباع می‌شود. این مسئله سبب به وجود آمدن یک زوال آهسته بسامد کم (WOW)، می‌شود.

این زوال بسامد کم، روی بسامدهای بالاتر قرار می‌گیرد و آنها را مغشوش می‌کند. اندازه و شدت این بسامدهای کم، به فاصله آنتن‌ها و همچنین مشخصات الکتریکی زمین وابسته است. برای حذف نوفه‌های بسامد کم معمولاً یک فیلتر بالاگذر بر داده‌ها اعمال می‌شود.

می‌شود. برای این منظور در نرم‌افزارهای GPR، یک مقدار زمینه برای تشخیص اولین رویداد، به کار می‌رود که به واسطه آن T اولین رویداد موج مستقیم هوا را تشخیص دهند. به خط‌شدگی موفقیت‌آمیز اولین رویداد باعث می‌شود که بازتاب‌ها در مکان واقعی‌شان به نمایش درآیند. از این رو در نخستین مرحله از پردازش با استفاده از پارامتر static correction، صفر زمانی رادارگرام تصحیح شد.

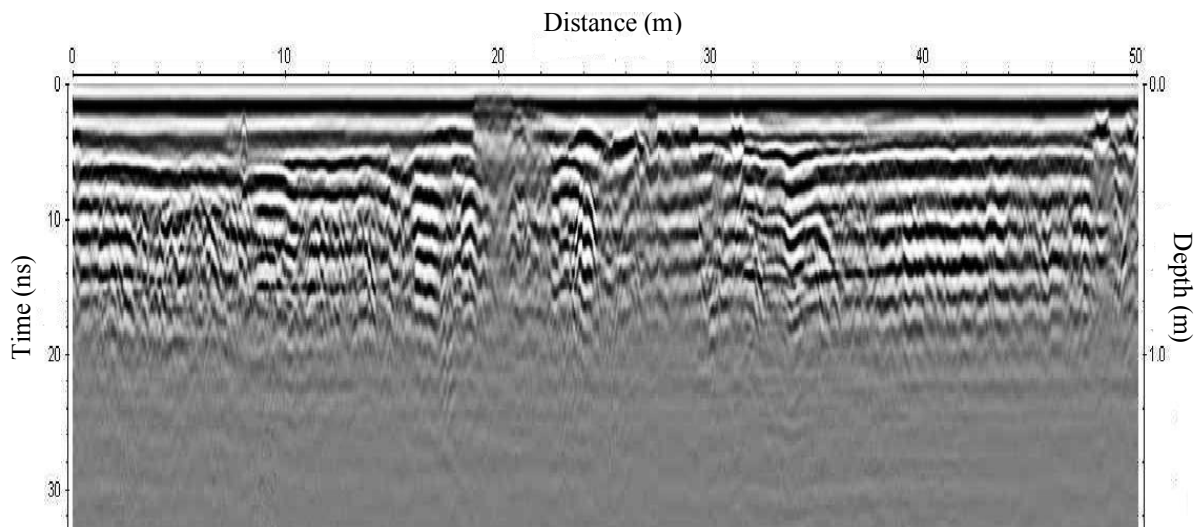
به علت فواصل زمانی کوتاه بین تپ‌های ارسالی با فرستنده، و تپ‌هایی که به صورت مستقیم از راه هوا و



شکل ۲. رادارگرام به دست آمده از برداشت داده‌های GPR با استفاده از آنتن ۵۰۰ مگاهرتز.

انتخاب شده واقع می‌شوند. در پردازش مقاطع رادار، معمولاً پهنای نوار بسامدی را از یک‌چهارم تا چهار برابر بسامد مرکزی در نظر می‌گیرند. بنابراین در این روش نرم‌افزاری، فیلترهای پردازشی هم‌زمان محدوده‌هایی از بسامد را با توجه به شرایط سامانه و محیط مورد بررسی، حذف می‌کنند. معمولاً بسامدهای قطع به صورت تقریبی از یک‌چهارم تا یک‌دوم و دوبرابر تا چهاربرابر بسامد مرکزی آنتن اعمال می‌شوند. مقادیر مناسب‌تر با آزمون و خطا به دست می‌آید. با انتخاب مقادیر ۱۵۰، ۲۷۰، ۸۰۰ و ۲۰۰۰ مگاهرتز، نتیجه اعمال پارامترهای پردازشی گفته شده، در رادارگرام شکل ۳ آمده است و به وضوح افزایش کیفیت رادارگرام در آن مشهود است. برای بهبود بیشتر کیفیت مقطع به دست آمده، از فیلتر دو بُعدی بردارنده زمینه (Background removal) استفاده می‌شود. این فیلتر، براساس انتخاب میانگین‌گیری تعداد مشخصی از تریس‌ها و کاستن تریس میانگین از بخش موردنظر پردازشگر در راستای محورهای زمان-جابه‌جایی رادارگرام عمل می‌کند. طبق روابط زیر، اگر P ، تعداد مشخصی از سیگنال‌ها و $A_{B(z)}$ ، نشان‌دهنده تریس میانگین

فیلتردیوایو (Dewow)، یک فیلتر بالاگذر است که برای گذراندن قله طیف سیگنال ارسالی برای بسامد مرکزی یک آنتن خاص طراحی شده است. در ادامه پردازش، با به‌کارگیری فیلتر دیوایو، اثر اشباع سیگنال از بین می‌رود. سپس با به‌کارگیری فیلتر بهره براساس جبران کاهش انرژی (Decay energy gain)، توان سیگنال‌ها در رادارگرام افزایش خواهد یافت. مرحله بعدی پردازش، محدود ساختن پهنای نوار بسامدی است. در حذف نوفه‌های محیطی و سامان‌مند که دارای بسامدی متفاوت با بسامد سیگنال هستند، معمولاً از فیلترهای حوزه بسامد استفاده می‌کنیم. این فیلترها سعی دارند یک نوار بسامد خاص را از روی داده‌ها حذف کنند. نکته قابل توجه در به‌کارگیری فیلترهای بسامدی، حفظ ویژگی‌های اصلی بازتاب‌های اولیه به سبب حفظ انرژی در اطراف بسامد مرکزی آنتن مورد استفاده است. معمولاً بسامدهای قطع، به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که نوارهای بسامدی یکسانی نسبت به بسامد مرکزی ایجاد کنند (دیویس و عنان ۱۹۸۹). در این مرحله با انتخاب بسامدهای قطع مناسب می‌توان با نگره‌داشتن بسامدهای مطلوب، نسبت سیگنال به نوفه را افزایش داد، زیرا بیشتر نوفه‌ها خارج از محدوده



شکل ۳. رادارگرام ۵۰۰ مگاهرتز پس از اعمال مراحل تصحیح صفر زمانی، دیوایو، بهره جبران کاهش انرژی و فیلتر محدودکننده بسامدی.

مربوط به بازتاب‌های سطحی است. میانگین سرعت در هذلولی‌های فاصله ۲۴ متری در عمق ۰/۲ متری و فاصله ۳۶ متری در عمق ۰/۵ متری، در برآزش با منحنی قله سرعت برابر با ۰/۱۱ متر بر ثانیه است. در رادارگرام آنتن ۵۰۰ مگاهرتز، دو هذلولی بازتابی در فاصله ۲۴ متری نیم‌رخ در عمق ۰/۲ متری و بازتاب‌های ضعیف‌تری در فاصله ۳۵ متری و عمق ۰/۵ متری مشاهده می‌شود.

با استفاده از آنتن ۲۵۰ مگاهرتز، رادارگرام دیگری به دست می‌آید که در شکل ۵ آمده است. در این مقطع خام نیز نشانه‌های لوله‌ها و کابل‌ها به سختی مشهودند. به علت جنس خاک منطقه که حاوی درصد زیادی از خاک رُس است، توان سیگنال به سبب میرایی زیاد امواج، به سختی به عمق بیشتر از ۲ متر می‌رسد. همچنین در بررسی‌های کم عمق بهتر است پس از تصحیح صفر زمانی، از فیلتر دیواینک برای حذف اثر اشباع سیگنال استفاده شود.

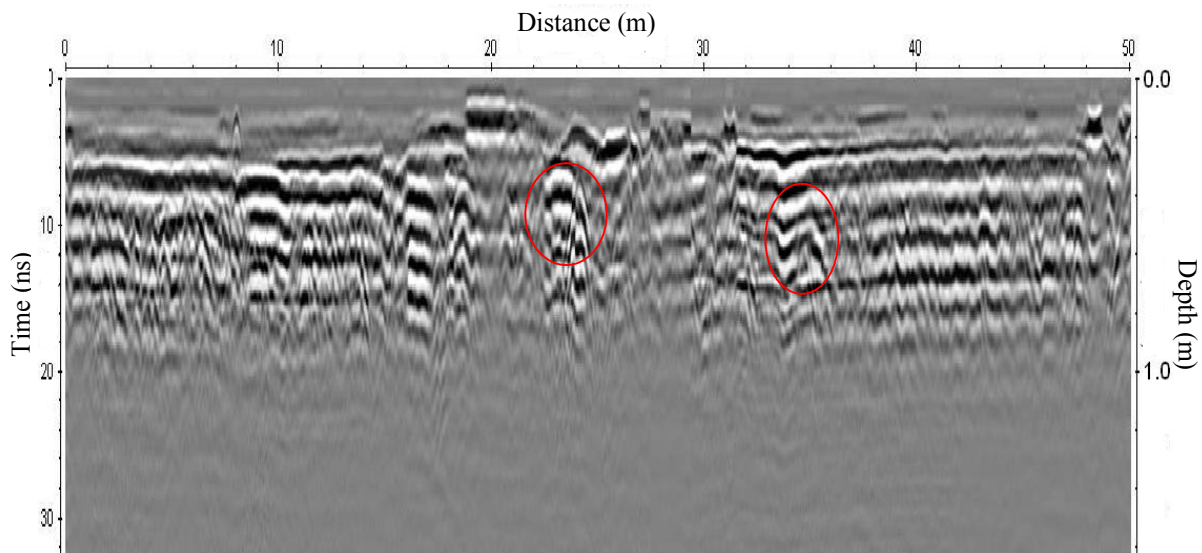
باشد، آن‌گاه $A_{BR}(x, y, z)$ ، میزان نوفه زمینه برداشته شده خواهد بود.

$$A_B(z) = \left(\frac{1}{P}\right) \sum_i^P A_i(x, y, z), \quad (4)$$

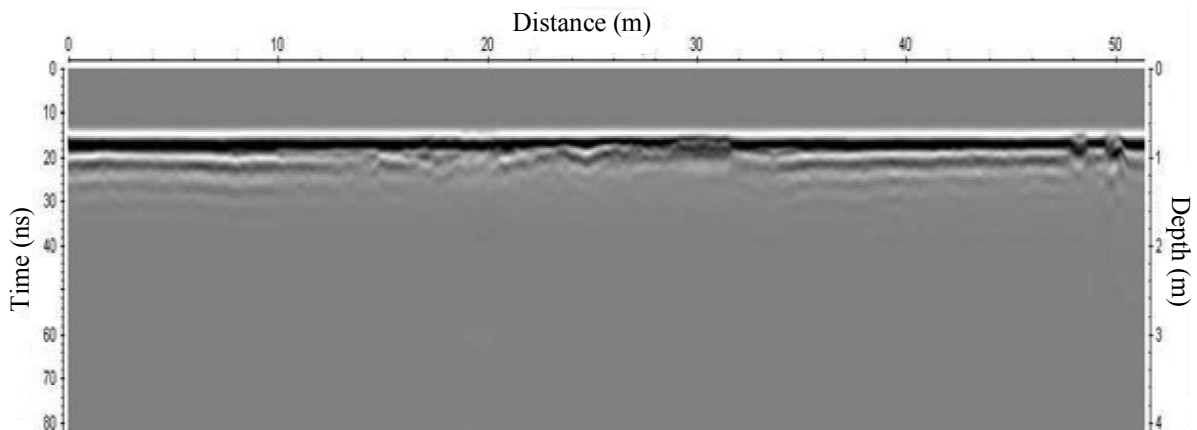
$$\rightarrow A_{BR}(x, y, z) = A(x, y, z) - A_B(z)$$

که نتیجه اثر این پارامتر پردازشی در شکل ۴ آمده است. در رادارگرام آنتن ۵۰۰ مگاهرتز (شکل ۴)، چند ناحیه وجود دارد که ممکن است مربوط به هذلولی‌های بازتابی باشد. فاصله ۸-۱۰ متری در عمق ۰/۲ متری و ۱۴ متری نیم‌رخ با عمق ۰/۸ متری، فاصله ۱۸-۲۰ متری در عمق ۰/۲ متری بی‌هنجاری دیده می‌شود. در فاصله ۲۴ متری نیم‌رخ در عمق ۰/۲ متری و فاصله ۳۶ متری نیم‌رخ در عمق ۰/۵ متری نیز بی‌هنجاری دیده می‌شود. پدیده‌ای که در فاصله ۸-۱۰ متری نیم‌رخ دیده می‌شود، در نمایش تریس به تریس (Wiggle Mode)، روی یک تریس واقع می‌شود و یک نوفه اتفاقی است.

سرعت هذلولی‌های پدیده‌ای که در فاصله ۱۸-۲۰ متری نیم‌رخ دیده می‌شود تقریباً برابر ۰/۳ متر بر ثانیه و



شکل ۴. مقطع نهایی به دست آمده از پردازش داده‌های رادار با آنتن ۵۰۰ مگاهرتز.

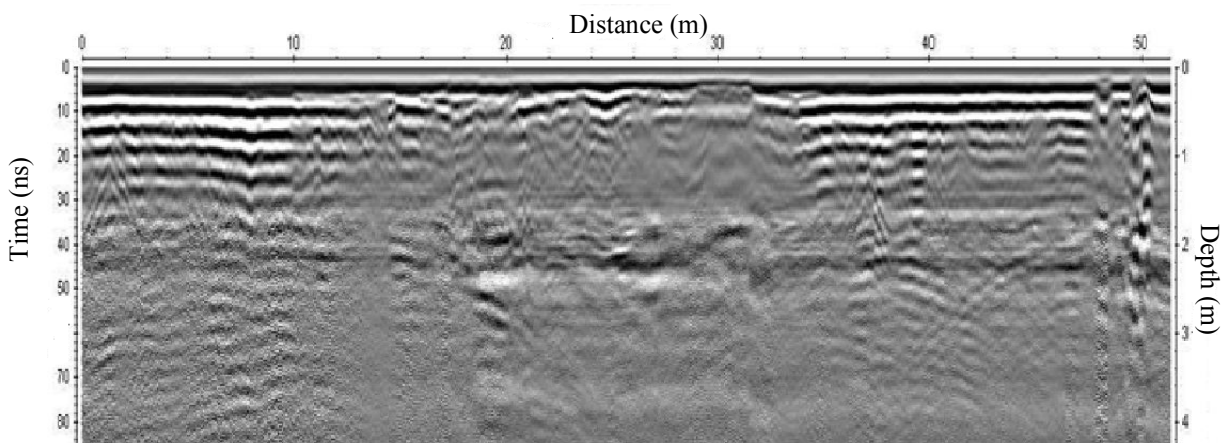


شکل ۵. مقطع خام به دست آمده از داده‌های برداشت شده با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز.

تضعیف امواج منجر خواهد شد. مقادیر اعمال شده عبارت‌اند از ۱۸ برای تابع بهره نمایی و ۱۰۰۰ برای حداکثر بهره که نتیجه پردازش‌های صورت پذیرفته را در شکل ۶ می‌توان مشاهده کرد.

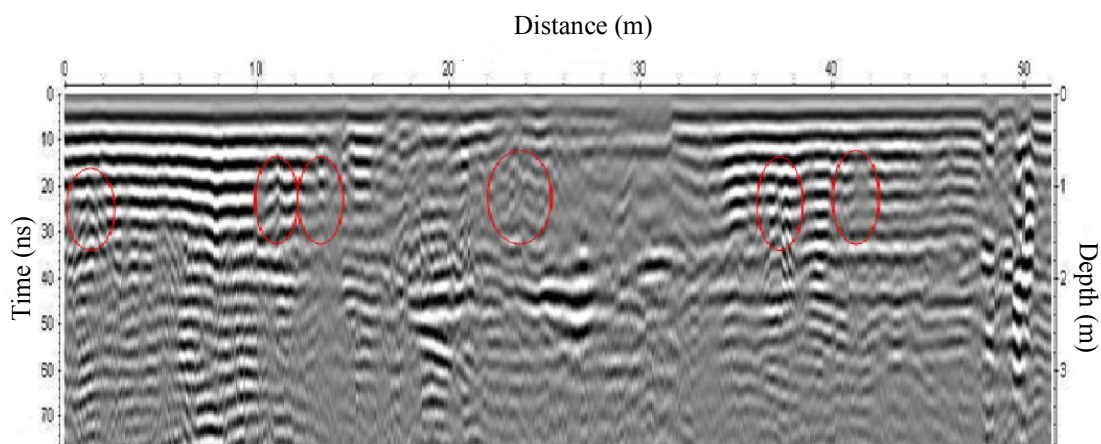
مرحله بعدی پردازش، محدود ساختن نوار بسامدی است. پیش‌تر بیان شد که یکی از متداول‌ترین روش‌ها، انتخاب بسامدهای قطع در محدوده یک‌چهارم تا یک‌دوم و دوبرابر تا چهار برابر بسامد مرکزی آنتن است. مقدار اعمال شده نهایی بسامدهای قطع فیلتر، براساس نظر پردازشگر و با توجه به بهبود کیفیت رادارگرام تعیین می‌شود.

بهره SEC، ترکیبی از بهره خطی و نمایی است. این بهره با توجه به محدودیت‌هایی که کاربر تعریف می‌کند و با استفاده از اطلاعات مربوط به اتلاف سیگنال ناشی از پخش هندسی و اتلاف نمایی امواج رادار در محیط برداشت، سعی در بازسازی شکل سیگنال و پاسخ‌های بازتابی دارد. از این رو پارامترهایی که کاربر برای استفاده از آن در نظر می‌گیرد بسیار حائز اهمیت است؛ چراکه با استفاده از این بهره، اطلاعات مربوط به دامنه نسبی حفظ می‌شود. این پارامترها شامل میزان بهره خطی، بیشینه مقدار بهره و همچنین اتلاف امواج رادار در محیط، که برای بازسازی شکل بازتاب‌ها اعمال می‌شود، هستند. استفاده از تابع بهره جبران نمایی و پخش هندسی به جبران میرایی و



شکل ۶. رادارگرام به دست آمده آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پس از تصحیح صفر زمانی و به‌کارگیری فیلترهای دیواینگ و بهره جبران کاهش

انرژی.

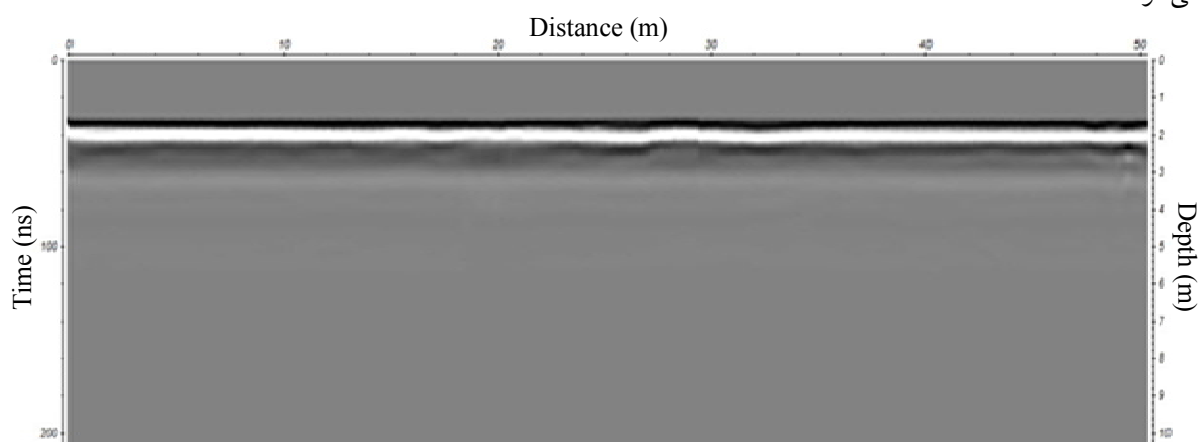


شکل ۷. مقطع پردازش شده داده‌های GPR با آنتن ۲۵۰ مگاهرتز پس از به کارگیری فیلتر میان‌گذر.

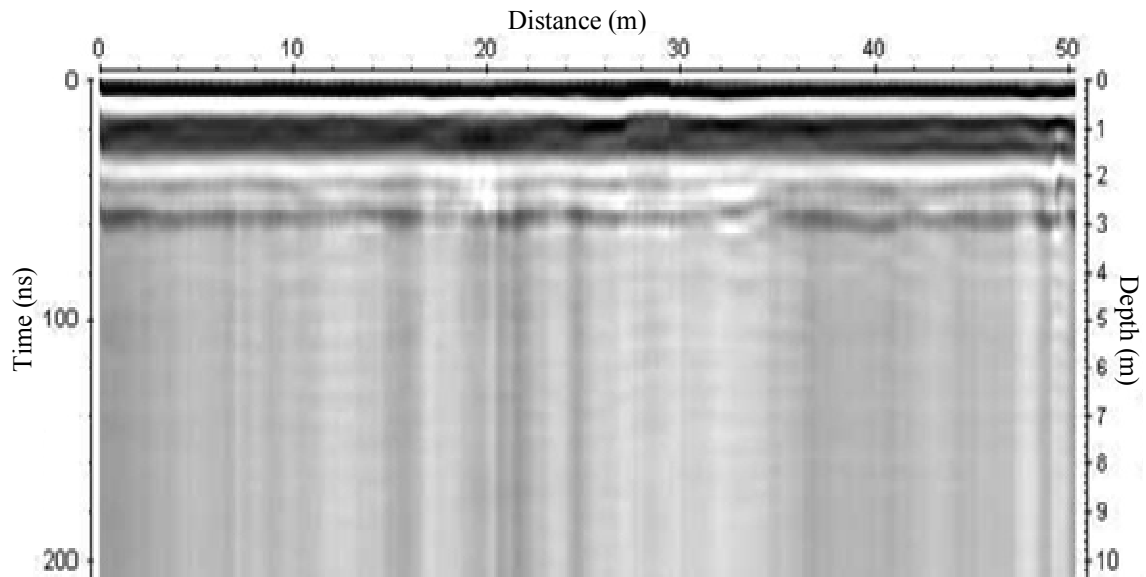
مرحله پایانی این تحقیق، نیم‌رخ‌زنی با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز است. این کار برای دستیابی به عمق بیشتر و موقعیت‌یابی تاسیساتی است که در عمق‌های بیش از ۲ متر قرار دارند. شکل ۸، رادارگرام خام به دست آمده از این برداشت را نشان می‌دهد. پردازش روی رادارگرام خام ۱۰۰ مگاهرتز، با تصحیح صفر زمانی و بهره دهی از نوع جبران میرایی و کاهش انرژی و همچنین به کارگیری فیلتر دیواینگ آغاز می‌شود. نتیجه پردازش‌های صورت پذیرفته در این مرحله رادارگرام شکل ۹ خواهد بود.

با انتخاب بسامدهای قطع ۹۰۰ و ۸۰، ۱۵۰، ۴۵۰ مگاهرتز مقطع شکل ۷ حاصل می‌شود. کیفیت این مقطع نسبت به مقطع ابتدایی به گونه‌ای افزایش یافته است که هدلولی‌های بازتابی از سطح لوله‌ها و کابل‌ها به راحتی قابل تشخیص‌اند.

در این رادارگرام، با توجه به نوفه‌های سطحی نمایان شده در فواصل ۴۸ و ۵۰ متری، هدلولی‌های بازتابی در فواصل یک متر، ۱۱ متر، ۱۳-۱۴ متر، ۲۳ متر، ۲۴ متر، ۳۷ متر و ۴۱ متر به ترتیب در عمق‌های تقریبی ۰/۶ متر، یک متر، یک متر، ۰/۶ متر، ۱/۲ متر، ۰/۷ متر و ۰/۶ متر دیده می‌شوند.



شکل ۸. رادارگرام خام به دست آمده از برداشت داده‌های GPR با استفاده از آنتن ۱۰۰ مگاهرتز.

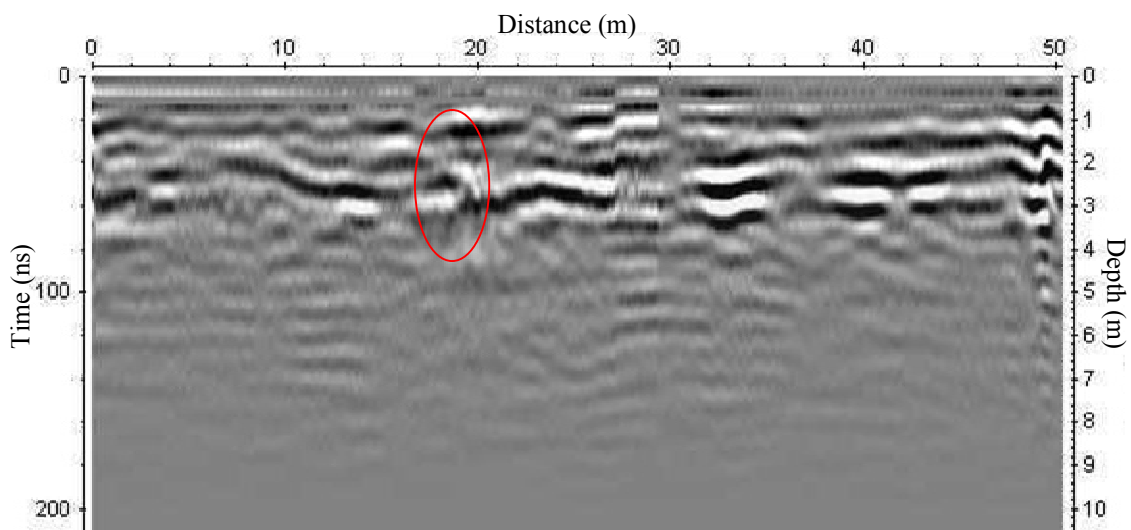


شکل ۹. مقطع داده‌های رادار، برداشت شده با آنتن ۱۰۰ مگاهرتز پس از پردازش ابتدایی.

۲-۲ تفسیر رادارگرام‌ها

با دقت در سه رادارگرام به دست آمده، دیده می‌شود که در رادارگرام آنتن ۱۰۰ مگاهرتز، یک هذلولی بازتابی وجود دارد که در رادارگرام آنتن ۲۵۰ مگاهرتز هم دیده می‌شود. می‌توان نتیجه گرفت که این بی‌هنجاری مشاهده شده

مرحله بعدی پردازش، استفاده از فیلتر میان‌گذر بسامدی است. بسامدهای قطع انتخاب شده عبارت‌اند از: ۳۰، ۶۰، ۲۵۰ و ۴۰۰ مگاهرتز. سپس با استفاده از فیلتر بردارنده نوفه، زمینه رادارگرام شکل ۱۰ به دست خواهد آمد. در این رادارگرام، به سختی می‌توان نشانه‌ای از هذلولی‌های بازتابی یافت. فقط بازتاب‌های نه‌چندان بارزی در فاصله ۱۹-۲۰ متری نیم‌رخ برآزش شده با منحنی میانگین سرعت یک متر بر نانو ثانیه دیده می‌شود.

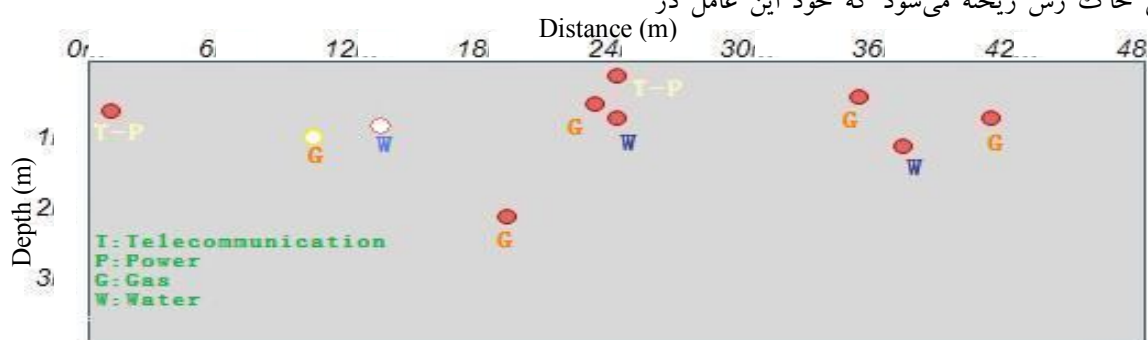


شکل ۱۰. رادارگرام نهایی پردازش شده آنتن ۱۰۰ مگاهرتز که در آن یک بازتاب ضعیف در فاصله ی نزدیک به ۲۰ متری مشاهده می‌شود.

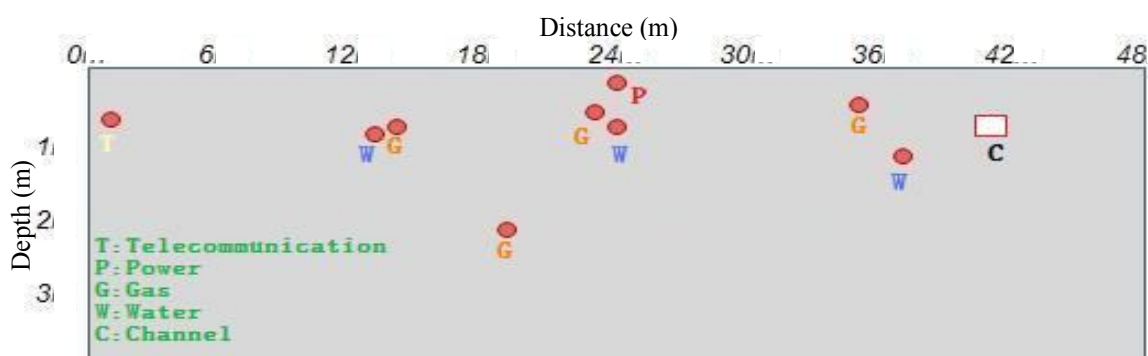
جذب امواج تاثیرگذار است. آب شیرین نه تنها یک محیط کم‌اتلاف برای امواج رادار است، بلکه یک بازتابنده خوب نیز به شمار می‌رود. ازین رو هذلولی‌هایی که مربوط به لوله‌های آب هستند، معمولاً نشان از بازتاب‌های خوبی دارند. البته نباید اهمیت جنس لوله آب را نادیده گرفت. معمولاً جنس این لوله‌ها آزبست یا پلی‌اتیلن است که در هر دو مورد به علت تباین خوب دی‌الکتریکی با محیط اطراف، بازتاب‌های خوبی در رادار گرام دیده می‌شود. در مورد کابل‌های برق یا مخابرات، به‌خاطر وجود میدان‌های مغناطیسی در اطراف کابل‌های برق یا مخابرات، و یا تباین زیاد دی‌الکتریکی که گاهی از لحاظ رسانایی به حالت تکیگی می‌رسد؛ این کابل‌ها به‌صورت هذلولی دندان‌های بسیار بارزی در رادار گرام‌ها نمایان می‌شوند، که نشان از اثر حضور میدان مغناطیسی اطراف این تاسیسات و یا یک بی‌هنجاری شدید اما منظم دی‌الکتریکی دارد.

به جسمی مربوط باشد که ابعاد یا قطر آن بیش از حد تفکیک آنتن ۱۰۰ مگاهرتز (۲۵ سانتی‌متر) است. این پدیده در ۱۹-۲۰ متری مقاطع (شکل ۷ و شکل ۹) در عمق بیش از دو متر با هذلولی‌های بازتابی ضعیفی دیده می‌شود.

برای تعیین نوع تاسیسات دیده شده، اصلی‌ترین فاکتور، چگونگی پدیدار شدن هذلولی‌های بازتابی در رادار گرام است. اگرچه این موضوع وابستگی بسیاری به جنس لوله‌ها یا کابل‌ها دارد؛ اما نوع ماده‌ای که در این لوله‌ها و کابل‌ها واقع می‌شوند نیز، اهمیت زیادی دارد. می‌توان گفت هنگامی که آنتن در امتداد عمود از روی یک لوله گاز می‌گذرد، نبود تفاوت بارز سرعت موج در هوا و گاز، مانع از پدیدار شدن هذلولی‌های بارز در بازتاب‌های خوب می‌شود و عملاً درصد کمی از امواج بازتاب خواهند کرد. این در حالی است که معمولاً در اطراف لوله‌های گاز، نوعی خاک رُس ریخته می‌شود که خود این عامل در



(الف)



(ب)

شکل ۱۱. (الف) نتایج به‌دست آمده از برداشت و تفسیر داده‌های GPR (ب) موقعیت واقعی لوله‌ها و بی‌هنجاری‌های دیگر.

اصلی لوله گاز باشد که قطر چنین لوله‌هایی معمولاً حدود ۳۰ سانتی‌متر است.

شکل ۱۱، نتایج به‌دست آمده از برداشت و تفسیر داده‌های GPR را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان این نتایج را با واقعیات زمین که پس از عملیات حفاری به‌دست آمده‌اند، مقایسه کرد.

با توجه به شکل‌های ۱۱-الف و ۱۱-ب، مشاهده می‌شود که بی‌هنجاری دیده شده در ۱۱ متری که به یکی از تاسیسات شهری نسبت داده شده بود، این‌گونه نبود و نشانه حضور بی‌هنجاری دیگری غیر از تاسیسات شهری است. برای تشخیص نوع این‌گونه بی‌هنجاری‌ها باید از اجرای شبکه داده‌برداری و تفسیر داده‌های سه‌بعدی بهره گرفت. همچنین در فاصله ۱۳ متری نیم‌رخ‌ها به‌جای حضور دو بی‌هنجاری، فقط یک بی‌هنجاری تشخیص داده شد. برای رفع چنین مواردی به نظر می‌رسد که برداشت نیم‌رخی در جهت عکس نیم‌رخ ابتدایی، می‌تواند مفید واقع شود. درنهایت، بی‌هنجاری مشاهده شده در فاصله ۴۱ متری به لوله گاز نسبت داده شده بود که در حقیقت نوعی حفره خالی کانال‌مانند بوده است. پس از عملیات حفاری مشخص شد که تفاوت قابل‌توجهی میان عمق‌های مشخص شده در رادارگرام و عمق واقعی تاسیسات وجود ندارد. به‌عبارتی، مقدار سرعت اعمال شده برای تبدیل زمان رسید امواج به عمق، مقدار بسیار کاربردی و مناسبی بوده است.

۳ نتیجه‌گیری

در این مقاله، دو موضوع چگونگی انتخاب آنتن و پردازش رادارگرام‌های به‌دست آمده در تحقیقات موقعیت‌یابی تاسیسات زیرسطحی شهری بررسی شد. به نظر می‌رسد که با توجه به عمق این تاسیسات و مشخصات فیزیکی آنها لازم است از آنتن‌هایی با بسامدهای گوناگون بهره گرفت. از آنتن‌های به کار گرفته شده با بسامدهای

بنابراین در شکل ۷، با توجه به رادارگرام آنتن ۲۵۰ مگاهرتز، هذلولی‌های زاویه‌داری که در فاصله یک متر از نیم‌رخ و عمق ۰/۸ متر و همچنین هذلولی‌های مشابهی که در فاصله ۲۳ متر و عمق تقریبی ۶۰ سانتی‌متر دیده می‌شوند، ممکن است مربوط به یک کابل برق یا مخابرات باشند. هذلولی‌هایی که در فاصله ۲۴ متر و عمق یک متر دیده می‌شود و همچنین هذلولی‌هایی با بازتاب قابل توجه که در فاصله‌ی ۳۷-۳۸ متر به چشم می‌رسند، به لوله آب نسبت داده می‌شوند. بازتاب‌هایی که در فاصله ۱۱ متر و عمق تقریبی ۰/۵ متر و فاصله‌های ۱۳-۱۴ متر و در انتهای نیم‌رخ فاصله ۴۱ متری در عمق ۰/۸ متر به چشم می‌رسند، با توجه به نوع هذلولی‌های ایجاد شده به لوله آب نسبت داده می‌شوند.

پدیده‌های دیگری که در رادارگرام دیده می‌شوند، به ترتیب عبارت‌اند از فواصل ۸ و ۲۱ متری که بازتاب‌های سطحی هستند. پدیده‌ای که در فاصله ۲۸ متر هم قابل مشاهده است، به‌خاطر وجود پراش‌های قابل توجه، به یک جسم نامتقارن نسبت داده می‌شود.

در رادارگرام آنتن ۵۰۰ مگاهرتز (شکل ۴)، پدیده‌هایی که مشاهده می‌شوند عبارت‌اند از فاصله ۱۸-۱۹ متر که به نظر می‌رسد به‌خاطر تغییر جنس سطح، رخ داده است. هذلولی‌های کاملاً مشخص فاصله ۲۴ متر در عمق کمتر از ۰/۵ متر که با توجه به نوع هذلولی‌ها به کابل برق نسبت داده می‌شود و درنهایت بازتاب‌های ضعیفی که در فاصله ۳۵ متر از نیم‌رخ واقع شده‌اند، احتمالاً به یک لوله گاز با قطر ۵ تا ۸ سانتی‌متر مربوط هستند.

در رادارگرام آنتن ۱۰۰ مگاهرتز (شکل ۱۰)، به نظر می‌رسد که فقط یک بازتاب ضعیف در فاصله ۱۹ متری در عمق ۲/۳ مشخص است و با توجه به ابعاد لوله‌ها که باید از حد تفکیک آنتن ۱۰۰ مگاهرتز بیشتر باشد و همچنین بازتاب‌های ضعیف، ممکن است نشان از حضور یک خط

- Bano, M., Pivot, F., and Marthelot, J., 1999, Modelling and filtering of surface scattering in ground-penetrating radar waves: First Break, **17**(6), 215–222.
- Conyers, B. L., 2004, Ground Penetrating Radar for Archaeology: Altamira Press, 16-21.
- Daniels, D., J., 2004, Ground Penetrating Radar: the Institution of Electrical Engineers Press.
- Davis, J. L., and Annan, A. P., 1989, Ground-penetrating radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy: Geophysical Prospecting, **3**, 531-551.
- Deparis, J., Fricout, B., Jongmans, D., Villemin, T., Effendiantz, T., and Mathy, A., 2008, Combined use of geophysical methods and remote techniques for characterizing the fracture network of a potentially unstable cliff site the "Roche du midi," Vercors massif, France: Journal of Geophysics and Engineering, **5**, 147–157.
- Endres, A. L., Booth, A. D., and Murray, T., 2004, Multi-frequency compositing of spatially coincident GPR datasets: Proceedings of the 10th International Conference on Ground Penetrating Radar, June 21-24, 2004, Delft, The Netherlands, 271–274.
- Gamba, P., and Lossani, S., 2000, Neural detection of pipe signatures in ground penetrating radar images: IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing, **38**(2), 790-797.
- Grasmueck, M., Weger, R., and Horstmeyer, H., 2006, Full-resolution 3D GPR imaging: Geophysics, **70**(1), K12–K19.
- Khaidukov, V., Landa, E., and Moser, J., 2004, Diffraction imaging by focusing-defocusing: an outlook on seismic superresolution: Geophysics, **69**(6), 1478–1490.
- Linford, N., 2006, The application of geophysical methods to archaeological prospection: Reports on Progress in Physics, **69**, 2205–2257.
- Neal, A., 2004, Ground Penetrating Radar and Its Use in Sedimentology: principles, problems and progress: Earth-science reviews, **66**, 261-330.
- Van der Kruk, J., and Slob, E. C., 2000, The influence of the soil on reflections from above surface objects in GPR data: Proceedings Eight international conference on Ground-Penetrating Radar, Queensland, Australia, May 23–26, 453–457.
- Westerdahl, H. R., Austvik, R., and Kong, F. N., 1992, Georadar in tunneling the tunnel radar. Geological Survey of Finland: Special Paper, **16**, 41–45.
- ۱۰۰ و ۲۵۰ و ۵۰۰ مگاهرتز، بهترین نتایج در رادارگرام آنتن ۲۵۰ مگاهرتز به دست آمد. پردازش‌های به کار گرفته شده نیز در این رادارگرام، برون‌داد بهتری نسبت به رادارگرام‌های دیگر داشتند.
- مقایسه نتایج رادارگرام‌ها با مشاهدات واقعی پس از حفاری، کاملاً رضایت‌بخش است و فقط در موارد انگشت‌شماری میان تفسیر رادارگرام‌ها و واقعیت، اختلاف وجود دارد. نکته قابل توجه این است که با وجود این تفاوت‌ها، هدف به کارگیری این روش ژئوفیزیکی در عملیات عمرانی و حفاری، تا حد بسیار مطلوبی تامین می‌شود. از این رو پیشنهاد می‌شود در امور گفته شده، روش ژئورادار در حکم روشی غیرمخرب، جایگزین روش‌های پرهزینه و مخرب گذشته شود.
- تشکر و قدردانی**
- نگارندگان مقاله لازم می‌دانند از شرکت مهندسی مشاور زمین، آب، پی برای تهیه و تدارک عملیات برداشت داده‌ها و همچنین از همکاری و مشاوره خانم ساناز اسمعیلی، نهایت سپاسگزاری را به عمل آورند. از آقای مهدی فلاح صفری جهت ویرایش تصاویر و متن، کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.
- منابع**
- Booth, A. D., Endres, A. L., Murray, T., 2009, Spectral bandwidth enhancement of GPR profiling data using multiple-frequency compositing; Journal of Applied Geophysics, **67**, 88–97.
- Alain Denis, A., Frédéric Huneau, A., Stéphane Hoerlé, B., and Andrew Salomon, B., 2009, GPR data processing for fractures and flakes detection in sandstone, Journal of Applied Geophysics, **68**, 282–288.
- Novais, A., Costa, J., Schleicher, J., 2008, GPR velocity determination by image-wave remigration: Journal of Applied Geophysics, **65**, 65–72.