

پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم‌عمق

ابوالقاسم کامکار روحانی^{۱*}، اسماعیل اسحقی^۲ و علیرضا عرب امیری^۳

^۱ دانشیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۲ دانش‌آموخته ژئوفیزیک، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
^۳ استادیار، دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

(دریافت: ۹۰/۲/۲، پذیرش نهایی: ۹۱/۱۰/۵)

چکیده

روش رادار نفوذی به زمین (GPR) به منزله یک روش غیرتخریبی به منظور آشکارسازی اهداف زیرسطحی واقع در عمق کم، براساس ارسال امواج الکترومغناطیسی به درون زمین و ثبت بازتاب‌های دریافت شده از امواج ارسالی، مورد استفاده قرار می‌گیرد. دانه‌بندی ذرات و وجود رس مواد زیرسطحی به دلیل تغییراتی که در میزان رسانندگی و گذردهی الکتریکی ایجاد می‌کنند و در نتیجه، ایجاد تغییر نسبی در عمق نفوذ امواج GPR قابل تشخیص و بررسی هستند. ساختارهای زیرسطحی کم‌عمق همچون حفره‌های زیرسطحی نیز که جنس و ضخامت‌های متفاوتی دارند به دلیل تباین در ویژگی‌های الکتریکی (رسانندگی و گذردهی) با روش GPR قابل آشکارسازی هستند. در این تحقیق برداشت GPR در طول ۵ نیم‌رخ در منطقه درخانیاب بخش مجن شهرستان شاهرود با استفاده از آنتن پوششی ۲۵۰ مگاهرتز صورت گرفته است. به علت فاصله کم بین فرستنده و گیرنده GPR، رسانندگی زمین مورد بررسی و وجود بازتاب‌های مزاحم یا ناخواسته با بسامد کم روی بازتاب‌های با بسامد زیاد و مغشوش کردن آنها، فیلتر Dewow روی همه داده‌های برداشت یا اعمال شده است. از جمله پردازش‌های دیگر اعمالی روی داده‌ها می‌توان انواع بهره‌ها (Gains) را نام برد که برای کاهش اثر تضعیف امواج ناشی از افزایش عمق نفوذ به کار گرفته شده است. روی نیم‌رخ‌های برداشتی، پردازش پوش (Envelope) نیز اعمال شد تا بتوان لایه‌بندی زیرسطحی را با دقت زیادی تعیین کرد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که با استفاده از مشخصه‌های امواج در مقاطع GPR، شناسایی اهدافی مانند حفره‌های زیرسطحی، تفکیک رسوبات زیرسطحی درشت‌دانه از ریزدانه و میزان رطوبت لایه‌های متفاوت زیرسطحی در منطقه با موفقیت زیادی امکان‌پذیر بوده است. قدرت تفکیک GPR در این تحقیق به گونه‌ای بود که در نیم‌رخ‌های با رسانندگی زیرسطحی کم می‌توان مرزهای قنات مانند مرز هوا-آب و آب-بتن را همچون لایه‌بندی خاک منطقه تعیین کرد. منطقه مورد بررسی در عمق کم از لایه‌های افقی خاک با ضخامت در حد چند سانتی‌متر پوشیده شده است. رسانندگی نسبتاً زیاد این منطقه نیز باعث شده است تا عمق نفوذ امواج GPR به ندرت حتی به ۲ متر نیز برسد.

واژه‌های کلیدی: رادار نفوذی به زمین، ثابت دی‌الکتریک، اهداف زیرسطحی، میزان رس

Processing and interpretation of ground-penetrating radar (GPR) data for detection of cavities, investigation of bedding and grain sizes and also estimation of clay content in shallow subsurface sediments

Kamkar Rouhani, A.¹, Eshaghi, E.² and Arab Amiri, A.³

¹Associate Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

²M.Sc. Student, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

³Assistant Professor, Faculty of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Iran

(Received: 22 Apr 2011, Accepted: 25 Dec 2012)

Abstract

Ground penetrating radar (GPR) method as a high resolution non-destructive geophysical

E-mail: kamkarr@yahoo.com

دورنگار: ۰۲۷۳-۳۳۹۵۵۰۹

تلفن: ۰۲۷۳-۳۳۹۵۵۰۹

*نگارنده رابط:

method is used for detection of shallow subsurface targets. This method is based on the transmission of electromagnetic waves inside the earth and recording the reflected waves from the subsurface. As the method uses high-frequency electromagnetic waves in the frequency ranges of 12.5 to 2500 MHz (called GPR waves), it can only be used for shallow subsurface investigations. Using this method, continuous images of the reflections of GPR waves from the interfaces of subsurface media with different electrical properties are obtained. Shallow cavities, due to their different electrical characteristics from the background, are among the targets which can be detected by this method. Since the depth of penetration of GPR waves in an area is controlled by the electrical conductivity and permittivity of the ground of the survey area, the depth of penetration of GPR waves, where fine-grained sediments are present, is relatively lower due to higher electrical conductivity of fine sedimentary grains compared to coarse sedimentary grains. Thus, the relative grain sizes and clay content of the subsurface sediments can be investigated by the GPR method. In general, shallow subsurface structures, having different materials and thicknesses, can be detected by the method as the structures and their host media normally have different electrical (namely, conductivity and permittivity) properties. In this research work, the GPR data acquisition has been carried out using 250 MHz shielded antenna along 5 lines in Darkhanyab area near Mojen Town, which is located at the distance of approximately 25 km northwest of Shahrood City. The purpose of this GPR survey is to detect shallow subsurface structures such as the water Qanat in the area. Due to the low distance between the GPR transmitter and receiver as well as the electrical properties, especially the conductivity of the ground, and also, to remove the unwanted low frequency signals or reflections while preserving the high frequency signals, the Dewow filter was applied before any other processing to all GPR data sets. Short time intervals between the transmitted GPR pulses and the pulses received directly from the air-ground surface, and also, the existence of reflections from the shallow subsurface targets, cause signal saturation in the receiver. For this, the Dewow filter is applied on the GPR data to correct for signal saturation or Wow in the data. Different types of gains are also among the processing methods applied on the data to reduce the attenuating effect of the GPR waves as the depth increases. To demonstrate the effects of different gains and to select the optimum gain, we applied different gains on the GPR data. To convert the trace from a wavelet with both positive and negative components (i.e. sine or cosine nature) to a mono-pulse wavelet with positive components, we used the envelope filter. This process removes the oscillatory nature of the radar wavelet and shows the data in its true resolution, making it easier to interpret. In this research, for processing the two-dimensional (2-D) GPR data or sections, Win_Ekko_Pro software was used. In addition, for three-dimensional (3-D) processing and modelling of the GPR data, EKKO-Mapper and EKKO-3D software programs were used. To display the output data from the Win_Ekko_Pro and EKKO-3D software programs, we also used T3D software. These software programs have been developed by Canadian Sensors & software Company.

The results of this research work indicate that using the characteristics of GPR waves in the 2-D GPR sections; we can detect the subsurface targets such as cavities and discriminate coarse-grained sediments from fine-grained sediments, and also, determine the electrical properties of subsurface layers with high success. High resolution of the GPR data in this research have enabled us to determine the water qanat interfaces with its surroundings such as soil-concrete, concrete-air, air-water and water-concrete interfaces in the subsurface. Furthermore, the high conductive clayey soils above the water qanat canal in some places cause high attenuation of the GPR waves, and thus, highly limit the depth of penetration of the GPR waves. This phenomenon is also seen in the surrounding

zone of the water qanat canal that mainly occurs due to the seepage of water to the ground. The soil bedding can also be easily observed in the obtained GPR sections. The horizontal soil layers, having thicknesses of several centimeters, have covered the surface of the ground in the survey area. A high resistive subsurface zone in the GPR sections, characterized by the ringing phenomenon, is interpreted as a cavity. In general, the relative high conductivity of the ground in the area causes to have a limited depth of penetration of the GPR waves that rarely exceeds 2 meters. The location of the water qanat in the shallow subsurface of the area was evident from the 2-D and 3-D GPR modeled sections. However, the detection of the water qanat in depths greater than 1 or 2 meters was difficult or even impossible from the GPR results due to the limited depth of penetration of the GPR waves in the area. Overall, it was possible to discriminate coarse-grained sediments from fine-grained sediments, and to some extent, to determine the amount of clay content and moisture in the subsurface from processing, modeling and interpretation of GPR data.

Key words: Ground penetrating radar (GPR), Dielectric constant, Subsurface targets, Clay content

۱ مقدمه

۱۹۷۴). پس از تولید تجاری این دستگاه‌ها، افزایش بی‌نظیر در استفاده از آنها، چاپ مقالات و تحقیقات با موضوع این روش آغاز شد. قدرت تفکیک زیاد روش GPR، سرعت برداشت داده‌ها و همچنین غیرمخرب بودن این روش علاوه بر در دسترس قرار گرفتن دستگاه‌های آن بر توسعه مصرف آن تاثیر بسزایی داشت (نیل، ۲۰۰۴). با استفاده از این روش تحقیقات بسیاری با موضوعات متنوعی مانند بررسی چینه‌شناسی خاک و شکستگی‌های درون سنگ‌های آذرین (دیویس و آنان، ۱۹۸۹)، شناسایی آب‌های زیرزمینی و سطح ایستابی (ون اورمیرن، ۱۹۹۴)، نقشه‌برداری سطوح سنگ کف (آنان، ۲۰۰۱)، بررسی خاک‌های یخ‌زده و منجمد (آنان، ۲۰۰۱)، زیست‌محیطی (نایت، ۲۰۰۱)، شناسایی حفره‌های زیرسطحی (کافمن و همکاران، ۲۰۰۶)، و حتی باستان‌شناسی صورت گرفته است. در کشور ما نیز تحقیقات معدودی در زمینه استفاده از روش GPR موجود است که از آن جمله می‌توان به آشکارسازی طاق‌های باستانی مدفون در خاک‌های نزدیک سطح (اویسی موخر و همکاران، ۱۳۸۴) آشکارسازی شکستگی‌ها و تاقدیس‌های نزدیک سطح

رادار نفوذی به زمین (GPR) (Ground Penetrating Radar) یکی از روش‌های با قدرت تفکیک زیاد ژئوفیزیکی است که با امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا (۵/۱۲ تا ۲۵۰۰ مگاهرتز) تغییرات خواص الکتریکی در اعماق کم را به‌منظور آشکارسازی زیرسطحی اندازه‌گیری می‌کند (وندام و اشلاگر، ۲۰۰۰). روش GPR در برداشت‌ها دارای چهار مزیت اساسی است: ساده، سریع، غیر مخرب و دقیق با قدرت تفکیک زیاد (شفری و همکاران، ۲۰۰۸). این خصوصیات باعث شده است تا این روش برای بررسی‌های کم‌عمق، کاربرد روزافزونی پیدا کند.

فکر استفاده از امواج الکترومغناطیسی بسامد بالا در بررسی‌های زیرسطحی، به مطالعات و اختراعات ثبت شده در آلمان ۱۹۰۴ از سوی هولسمیر (Hulsmeyer) بازمی‌گردد (آپاروا، ۱۹۹۷). نخستین برداشت رادار در سال ۱۹۲۹ برای تعیین عمق یک رودخانه یخ‌زده در اتریش صورت گرفت (استرن، ۱۹۲۹). در ۱۹۷۲ رکس موری (Rex Morey) و آرت دریک (Art Derrick) نخستین سامانه‌های تجاری رادار را ساختند (موری،

داده‌های برداشت شده یک مقطع زمانی است که در آن محور قائم، فاصله زمانی ارسال موج از فرستنده و دریافت با گیرنده را نشان می‌دهد. برای تعیین موقعیت مکانی رویدادها، باید این زمان‌ها به عمق تبدیل شوند یعنی این مقطع به مقطعی که محور قائم آن عمق را نمایش دهد، تبدیل شود. برای این منظور لازم است تا سرعت سیر موج در ساختارهای زیرسطحی منطقه مورد بررسی، محاسبه شود.

در استفاده از دستگاه Noggin Plus، که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته، سه راه برای برآورد سرعت وجود دارد که عبارت‌اند از:

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

(۲) استفاده از اهداف مدفون در عمق معین

(۳) برآورد سرعت با توده‌های زیرسطحی با توجه به محیط مورد بررسی (راهنمای نرم‌افزار سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹ا)

در روش هذلولی پراش باید به این نکته توجه کرد که به هنگام نیم‌رخ زنی، در صورت عبور دستگاه GPR از روی یک جسم بازتاب‌کننده قوی نظیر لوله فلزی، بازتاب‌های حاصل از این جسم روی مقاطع زمانی رادار به شکل هذلولی خواهد بود. با توجه به نکته فوق در صورت عبور نیم‌رخ برداشتی از روی این بازتاب‌کننده‌ها و مواجهه با هذلولی پراش برای تعیین سرعت تپ در زمین از گزینه CALIB که به هنگام نیم‌رخ زنی در صفحه نمایش ویدئویی دیجیتالی (Digital Video Logger) یا DVL دستگاه ظاهر می‌شود، استفاده می‌کنیم. با انتخاب این گزینه یک هذلولی روی صفحه DVL ظاهر می‌شود. با جابه‌جایی این هذلولی و انطباق کامل آن با هذلولی ناشی از جسم بازتاب‌کننده، سرعت متوسط تپ با دستگاه محاسبه می‌شود.

اهداف مدفون در اعماق معین نیز می‌تواند یکی از

(اویسی موخر، ۱۳۸۶) آشکارسازی قنات و لوله‌های مدفون زیرسطحی (محمدی ویژه، ۱۳۸۷؛ حسینی، ۱۳۸۸) و تعیین ضخامت آسفالت (مزینانی، ۱۳۸۹) اشاره کرد.

در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از روش GPR در بررسی‌ها، قدرت این روش در نمایش اهداف مشخص زیرسطحی، لایه‌بندی‌ها، و نیز تفسیر کیفی ابعاد ذرات در موقعیت‌های گوناگون مورد بررسی قرار گیرد. داده‌های این تحقیق با دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Sensors & Software برداشت شدند. آنتن مورد استفاده برای برداشت داده‌های GPR، آنتن پوششی (Shielded) با بسامد ۲۵۰ مگاهرتز است. برداشت‌ها به صورت پیوسته و با روش نیم‌رخ زنی صورت گرفت.

۲ روش‌شناسی

روش GPR روش بازتاب تپ (پالس) الکترومغناطیسی برای بررسی‌های کم‌عمق با قدرت تفکیک زیاد است. این روش مشابه با لرزه‌نگاری بازتابی است که بر مبنای انتشار و بازتاب موج عمل می‌کند (بلیندو و همکاران، ۲۰۰۷).

در حالت ساده یک دستگاه GPR از یک تولیدکننده سیگنال تشکیل شده است. سیگنال ایجاد شده با این تولیدکننده به وسیله آنتن فرستنده به درون زمین فرستاده می‌شود. امواج با سرعت زیادی در زمین منتقل می‌شوند. هنگامی که این امواج به یک شی و یا سطح بازتاب برخورد می‌کنند، بر اثر تغییر امپدانس الکترومغناطیسی در این محل‌ها، قسمتی از امواج از سطح بازتاب خواهد شد (پاراسنیس، ۱۹۹۷). آنتن گیرنده مستقر در دستگاه، این بازتاب‌ها را به صورت یک پیک بالا نشان می‌دهد و زمان حرکت و دامنه‌های بازتاب را ضبط می‌کند. زمان رفت و برگشت موج از آنتن فرستنده و بازتاب از اهداف زیرسطحی و دریافت در گیرنده، از چند ده تا چندین هزار نانو ثانیه متغیر است. دستگاه‌های GPR در واقع زمان رسید امواج را اندازه‌گیری می‌کنند. در نتیجه مقطع اولیه نمایش

۳) تراوایی مغناطیس (Magnetic permeability) که با μ نمایش داده می‌شود.

موج الکترومغناطیس درون زمین به صورت یک مخروط سه‌بُعدی به سمت پایین حرکت می‌کند و در این حین عواملی بر سرعت و اتلاف این امواج تأثیر می‌گذارند. سرعت امواج GPR در محیط‌های زیرسطحی از رابطه زیر محاسبه می‌شود (نیل، ۲۰۰۴):

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

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

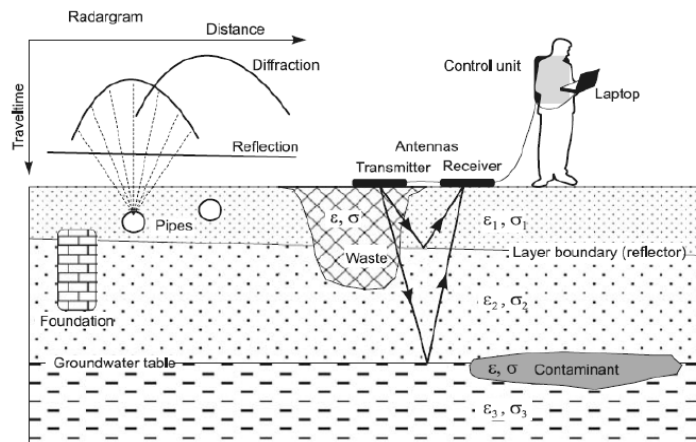
$$V = \frac{C_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

روش‌های تعیین سرعت سیر موج در زمین باشد. اگر عمق یک هدف که روی مقطع GPR مشخص است، در دست باشد، می‌توان با استفاده از مقادیر متفاوت سرعت در نرم‌افزار و مقایسه بین مقطع عمقی به دست آمده و عمق هدف، سرعت دقیق را تعیین کرد.

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

در شکل ۱ شمایی ساده از دستگاه GPR قابل مشاهده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، این روش در شناسایی اهدافی مانند لوله‌های مدفون، پی‌بندی‌ها، موقعیت آلودگی، محل و مرز باطله‌ها، سطح ایستایی و نیز مرز لایه‌بندی‌ها روشی موفق است (نودل و همکاران، ۲۰۰۷).

مهم‌ترین پارامترهایی که رفتار امواج الکترومغناطیس در یک محیط را تعیین می‌کنند عبارت‌اند از (نیل، ۲۰۰۴):
 ۱) گذردهی دی‌الکتریک (Dielectric permittivity) که با ϵ نمایش داده می‌شود.
 ۲) رسانندگی الکتریکی (Electric conductivity) که با σ نشان داده می‌شود.



شکل ۱. اجزا دستگاه GPR و اهداف قابل شناسایی با آن (نودل و همکاران، ۲۰۰۷).

اگر برخورد موج به فصل مشترک دو محیط به صورت عمودی باشد، ضرایب بازتاب (R) و عبور (T) به ترتیب با روابط زیر بیان می شود (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$R = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (5)$$

$$T = \frac{2z_2}{z_2 + z_1} \quad (6)$$

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

اگر محیط غیر مغناطیسی باشد با فرض اینکه: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_0$ ، ضریب بازتاب با رابطه زیر بیان می شود (آنان، ۲۰۰۱):

$$R = \frac{(\omega \varepsilon_1 + i \sigma_1)^{1/2} - (\omega \varepsilon_2 + i \sigma_2)^{1/2}}{(\omega \varepsilon_1 + i \sigma_1)^{1/2} + (\omega \varepsilon_2 + i \sigma_2)^{1/2}} \quad (7)$$

که در آن، ε گذردهی مطلق محیط است. برای ساده کردن رابطه بالا شرایط را محدودتر می کنیم و با در نظر گرفتن $\sigma_1 = \sigma_2 = 0$ یعنی دو محیط نارسانا، و با قرار دادن $\varepsilon_i = \varepsilon_{ir} \varepsilon_0$ ، خواهیم داشت (آنان، ۲۰۰۱):

$$R = \frac{\sqrt{\varepsilon_{1r}} - \sqrt{\varepsilon_{2r}}}{\sqrt{\varepsilon_{1r}} + \sqrt{\varepsilon_{2r}}} \quad (8)$$

که در آن، ε_{1r} و ε_{2r} به ترتیب گذردهی نسبی محیط های ۱ و ۲ نسبت به گذردهی مطلق هوا (ε_0) هستند.

صرف نظر از توده های فلزی، توده های غیر معمول گرافیتی و سولفیدی با رسانندگی زیاد، مواد مغناطیسی نظیر مگنتیت و هماتیت، خاک های اشباع از آب، فصل مشترک آب شور و مواردی نظیر این، رابطه (۸) با دقت نسبتاً خوبی ضریب بازتاب را نشان می دهد.

سنگ های خشک معمولاً دارای گذردهی نسبی در

در استفاده از رابطه (۲) باید این نکته را مد نظر قرار داد که در برخورد با مواد با رسانندگی زیاد نظیر آب دریا و برخی از انواع رس ها و یا در برخورد با مواد مغناطیسی نظیر مگنتیت و هماتیت این رابطه صحیح نیست (آنان، ۲۰۰۱). ولی خوشبختانه در اکثر کاربردهای GPR با تقریب خوبی می توان از این رابطه استفاده کرد.

مشخصات الکترومغناطیس مواد، به مواد تشکیل دهنده و همچنین میزان آب موجود در آنها بستگی دارد و هر کدام از این پارامترها دارای تأثیر بسزایی روی سرعت و اتلاف امواج GPR هستند. برخی از مواد مانند یخ های قطبی، نسبت به امواج GPR شفاف بوده و این امواج بدون اتلاف زیاد می توانند از آن عبور کنند. برخی دیگر از مواد مانند رُس های اشباع از آب و همچنین آب دریا نسبت به این امواج کدر هستند و این امواج را بازتاب و یا جذب می کنند (رینولدز، ۱۹۹۷). از این رو امواج GPR در فواصل کوتاهی تلف (میرا) می شوند و نمی توانند در این گونه محیط ها انتشار یابند.

همان طور که ذکر شد، قسمتی از موج الکترومغناطیس در برخورد با فصل مشترک دو محیط با امپدانس های الکترومغناطیس متفاوت، بازتاب می شود و قسمت دیگر عبور می کند. انرژی عبوری ممکن است از فصل مشترک های دیگر در زیر این لایه بازتاب شود. امپدانس Z در هر محیط با رابطه زیر بیان می شود (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$Z = \frac{\omega \mu}{\kappa} \quad (3)$$

که در آن κ به صورت زیر تعریف می شود (پاراسنیس، ۱۹۹۷):

$$\kappa = (\omega^2 \varepsilon \mu + i \omega \mu \sigma)^{1/2} \quad (4)$$

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

به گیرنده می‌رسد بیشتر است و فصل مشترک موردنظر بهتر آشکارسازی می‌شود. برای مثال فصل مشترک خاک و فلز دارای ضریب بازتابی در حدود ۱- است، به این معنی که تمام انرژی موج ارسالی از این فصل مشترک بازتاب می‌شود. از این رو فلزات مدفون در خاک اهداف بسیار مناسبی برای آشکارسازی به روش GPR هستند. فصل مشترک خاک و سنگ، دارای ضریب بازتاب کمتری نسبت به دیگر فصل مشترک‌ها است. از تفاوت بین ضرایب بازتاب در این فصل مشترک‌ها می‌توان در تفسیر داده‌های GPR استفاده کرد.

جدول ۱. گذردهی نسبی محیط‌های متفاوت به همراه ضرایب بازتاب (زنگ و مکمگان، ۱۹۹۷).

فصل مشترک	ϵ_{r1}	ϵ_{r2}	ضریب بازتاب
هوا-خاک خشک	۱	۴	-۰/۳۳
هوا-خاک مرطوب	۱	۲۵	-۰/۶۷
خاک خشک-خاک مرطوب	۴	۲۵	-۰/۴۳
خاک خشک-سنگ	۴	۶	-۰/۰۱
خاک مرطوب-سنگ	۲۵	۶	۰/۳۴
یخ-آب	۳/۲	۸۱	-۰/۶۷
خاک مرطوب-آب	۹	۸۱	-۰/۰۵
خاک مرطوب-هوا	۹	۱	۰/۰۵
خاک خشک-فلز	۴	۳۰۰	۱ ≈ -

حدود ۵ تا ۷ هستند (پاراسنیس، ۱۹۹۷). رطوبت مقدار گذردهی نسبی را افزایش می‌دهد و اگر آب در خلل و فرج و شکستگی‌های سنگ به مقدار قابل توجهی موجود باشد، گذردهی نسبی به مقدار نسبتاً زیادی خواهد رسید. در سنگ‌های رسوبی، زیر سطح ایستابی ممکن است گذردهی نسبی به مقدار ۲۵ نیز برسد. با این حال معمولاً رسانندگی زیاد تحت تأثیر قرار نمی‌گیرد و در رابطه (۷)، هنوز $\sigma_2 \ll \omega \epsilon_2$ است و بازهم می‌توانیم از آن صرف‌نظر کنیم. از رابطه (۸) ضریب بازتاب در سطح ایستابی در حدود ۰/۳۳- به دست می‌آید که مقدار نسبتاً زیادی است و نشان می‌دهد که در اکتشاف سطح ایستابی، GPR روشی بسیار قدرتمند است. علامت منفی موجود در ضریب بازتاب سطح ایستابی به علت عبور موج از محیط با امپدانس الکترومغناطیس زیاد به محیط با امپدانس الکترومغناطیس کم است.

همان‌طور که در رابطه (۸) دیده می‌شود، بازتاب امواج به سبب تغییر در گذردهی نسبی در فصل مشترک دو محیط باعث آشکارسازی فصل مشترک مزبور خواهد شد. تغییر در نوع مایع محتوی سازند، تغییرات کوچک در تخلخل، تغییر در نوع و شکل ذرات رسوبی و همچنین جهت‌گیری و چینش (Packing) آنها، تماماً بازتاب‌های خوبی را باعث می‌شوند (نیل، ۲۰۰۴). در نتیجه پدیده‌هایی نظیر سطح ایستابی، ساختارهای رسوبی و مرز بین واحدهای سنگی، بایستی به خوبی به روش GPR قابل آشکار سازی باشد.

برای به دست آوردن یک مقیاس کمی از ضرایب بازتاب و مطالبی که تاکنون ذکر شد، توجه به جدول ۱ می‌تواند بسیار مؤثر واقع شود. در این جدول ϵ_{r1} و ϵ_{r2} گذردهی نسبی محیط‌های اول و دوم هستند که در ستون اول جدول به ترتیب فهرست شده‌اند. هرچه قدر مطلق ضریب بازتاب بزرگ‌تر باشد، انرژی که

هدف مورد بررسی انتخاب شد. در اینجا باید ذکر شود که قسمت بالایی قنات از هوا پر شده است، اما هوا نیز اختلاف ثابت دی الکتریک مناسبی با محیط اطراف و آب دارد، همچنین میزان اتلاف امواج GPR در آن نیز بسیار کم است.

پس از انتخاب هدف مناسب به منظور بررسی مزایا و معایب این روش، نوبت به انتخاب محلی مناسب برای اجرای عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها است. به علت محدودیت های روش TGRP هدف مورد بررسی باید در عمق کمی قرار داشته باشد و توپوگرافی سطحی نیز چندان شدید نباشد. در نهایت با بررسی قنات های گوناگون، قناتی با مشخصات و شرایط مناسب در منطقه درختانیاب مجن شهرستان شاهرود انتخاب شد (شکل ۲). ساختار زمین شناسی محدوده برداشت، شامل آبرفت های دانه متوسط ناشی از هوازدگی سنگ های ارتفاعات اطراف بود که این نکته در تفسیر، مورد توجه قرار گرفت. برداشت ها عمود بر جهت قنات و در نزدیکی مظهر آن که عمق آب کمتری دارد، صورت گرفت.

نکته مهم دیگر در بررسی روش GPR عمق نفوذ این روش است. عمق نفوذ تپ با بسامد مرکزی GPR، رسانایی الکتریکی و گذردهی مواد زیر سطحی کنترل می شود و به طور کلی بسامد مرکزی زیاد آنتن و رسانندگی مواد زیر سطح زمین موجب کاهش عمق نفوذ تپ های GPR می شود (رینولدز، ۱۹۹۷). عوامل متعددی روی خواص الکتریکی محیط و بالطبع بر عمق نفوذ موج الکترومغناطیسی ارسالی تأثیر می گذارند که از جمله مهم ترین عوامل مؤثر آنها می توان به مواردی چون رسانندگی لایه ها، میزان آب، دانه بندی رسوبات زیر سطحی و میزان رُس اشاره کرد.

۳ عملیات صحرائی و برداشت داده‌ها

برای بررسی کارایی روش GPR در عمل، قبل از هر چیز نیاز به انتخاب یک هدف مناسب، ضروری به نظر می رسد. آب های زیرزمینی به دلیل داشتن گذردهی دی الکتریک زیاد در مقایسه با رسوبات و سنگ های تشکیل دهنده پوسته، از اهداف خوب برای آشکارسازی به روش GPR هستند. به همین دلیل قنات آب به منزله



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی محدوده برداشت. محل برداشت با علامت X در شکل مشخص شده است.

تعداد زیادی نیم‌رخ به‌منظور به‌دست آوردن داده‌های مناسب برداشت شد که از این تعداد، ۵ نیم‌رخ به‌منظور تفسیر کامل انتخاب شده و در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که قبلاً گفته شد داده‌های GPR در این تحقیق با دستگاه Noggin Plus ساخت شرکت کانادایی Software & Sensors برداشت شده است. دستگاه پیش‌گفته از آنتن پوششی ۲۵۰ مگاهرتز برای ارسال تپ‌های الکترومغناطیسی استفاده می‌کند. داده‌های GPR برداشت شده با نرم‌افزار Win_Ekko_Pro پردازش شده و خروجی آنها با نرم‌افزار Transform به نمایش درآمده است.

۴ پردازش و تفسیر داده‌ها

با توجه به مشخص بودن تقریبی عمق قنات در برخی نیم‌رخ‌ها که باعث ایجاد هذلولی‌های مشخص در مقاطع GPR حاصل از این نیم‌رخ‌ها می‌شود و با استفاده از برازش هذلولی مدل با هذلولی ناشی از اهداف زیرسطحی، سرعت امواج GPR در محیط زیرسطحی برابر ۰/۱ متر بر نانو ثانیه به‌دست آمد.

مسئله مهم دیگر در بررسی روش GPR اعمال پردازش‌های مناسب روی داده‌ها به‌منظور تفسیر معتبر است. هدف مورد بررسی نوع و میزان پردازش‌های اعمالی را تعیین می‌کند. برخی از اهداف مورد بررسی فقط به پردازش‌های اولیه نیاز دارند درحالی‌که در برخی تحقیقات باید پردازش‌های پیشرفته‌ای روی داده‌ها اعمال شود. پردازش‌ها در این مبحث به ۳ گروه تقسیم می‌شود. پردازش اول اعمال تصحیح اشباع سیگنال (Dewow) است. درباره پردازش Dewow باید گفت که به‌دلیل نزدیکی فرستنده و گیرنده و همچنین خصوصیات الکتریکی زمین ممکن است در اثر یا سیگنال دریافت شده، بازتاب‌های بسامد کم (Wow) روی بازتاب‌های بسامد زیاد تأثیر گذاشته و یا به آنها اضافه شده باشد. با

اعمال پردازش Dewow این اثر بسامد کم تا حدود زیادی تصحیح می‌شود (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹a). در این تحقیق این پردازش روی همه داده‌ها اعمال شده است. پردازش بعدی اعمال بهره‌های متفاوت روی داده‌ها است. نکته قابل توجه در این قسمت کاهش قدرت سیگنال با افزایش عمق نفوذ GPR است که در نهایت باعث می‌شود تا توان پردازش در عمق به‌طور تصاعدی کاهش یابد. برای رفع این مشکل، اعمال بهره روی داده‌ها ضروری به نظر می‌رسد. بهره‌ها توابعی متغیر با زمان هستند که روی داده‌ها اعمال می‌شود. هدف از پردازش بهره، تقویت سیگنال‌های ضعیفی است که از اعماق بیشتر می‌آیند. بهره‌ها انواع گوناگونی دارند (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹a). در این تحقیق سعی شده تا به‌منظور نمایش بهتر و بررسی اثرات بهره‌های گوناگون، روی هر نیم‌رخ بهره متفاوتی اعمال شود. نوع دیگر پردازش اعمال شده روی داده‌ها، پردازش پوش (Envelope) است. تپ ارسال از دستگاه GPR شامل امواج سینوسی و کسینوسی با هر دو دامنه مثبت و منفی است. مشخصه پوش یک تپ دارای هر دو مؤلفه مثبت و منفی را به یک تپ با مؤلفه مثبت تبدیل می‌کند. در حقیقت این پردازش ماهیت نوسانی امواج رادار را از بین می‌برد و داده‌ها را در قدرت تفکیک واقعی خود نمایش می‌دهد. همچنین با اعمال این پردازش، محیط همگن داخل هر لایه به آسانی قابل تشخیص و تفکیک است. برای نمایش مرزهای لایه‌بندی این مشخصه بسیار مفید خواهد بود (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹a).

نیم‌رخ‌های برداشت شده در جهت عمود بر مسیر قنات و با طول تقریبی ۴۰ متر برداشت شد و سعی شد تا که قنات تقریباً در وسط هر نیم‌رخ قرار داشته باشد. اولین نیم‌رخ برداشتی در فاصله ۹۶ متری از مظهر قنات و با طول ۴۳ متر برداشت شد که در شکل ۳ نمایش داده شده است. برای نمایش قنات و وضعیت دانه‌بندی در

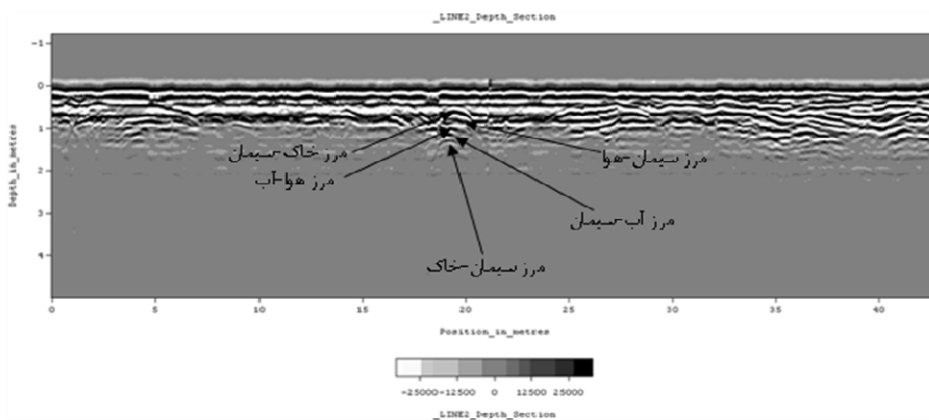
می‌توان این افزایش عمق نفوذ را متأثر از افزایش دانه‌بندی ذرات زیرسطحی و کاهش میزان رُس نسبت به دیگر قسمت‌های نیم‌رخ دانست.

برای نمایش لایه‌بندی، علاوه بر پردازش‌های صورت گرفته، مشخصه پوش نیز روی داده‌ها اعمال شد. مقطع عمقی به‌دست آمده در شکل ۴ قابل مشاهده است. نکته مهمی که در تفسیر لایه‌بندی باید مورد توجه قرار گیرد این است که در برداشت‌های GPR دو اثر ابتدایی رسیده به گیرنده، به ترتیب متعلق به موج مستقیم رسیده از فرستنده به گیرنده و بازتاب ناشی از سطح است. روی مقطع نمایش داده شده در شکل ۴، تصحیح صفر زمانی نیز اعمال شده است تا این ۲ اثر تفسیر را دچار خطا نکند. با مشاهده مقطع عمقی شکل ۴ می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که در این نیم‌رخ لایه‌بندی مشخصی مشاهده نمی‌شود و تا عمق موردبررسی GPR، به‌هم‌ریختگی لایه‌بندی به‌وضوح قابل مشاهده است.

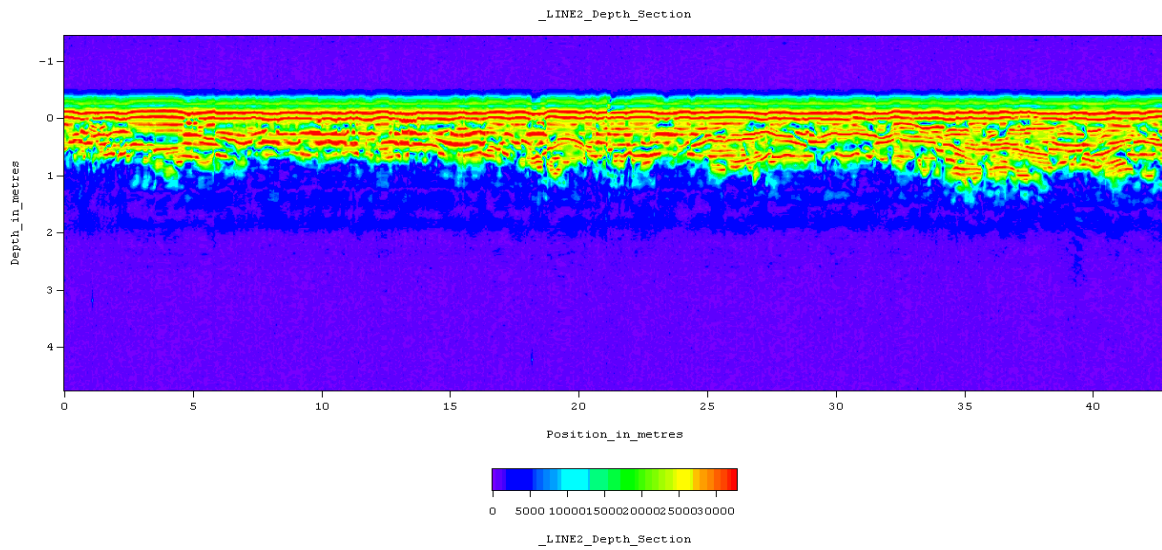
نیم‌رخ دوم در فاصله ۴۰ متری نیم‌رخ اول و ۱۳۶ متری مظهر قنات برداشت شد. شکل ۵ مقطع عمقی این نیم‌رخ را با اعمال فیلتر Dewow و بهره AGC با حداکثر تقویت ۵۰۰ نمایش می‌دهد. قنات در این مقطع قبل از موقعیت ۲۰ متری نیم‌رخ قرار دارد و از عمق ۰/۵۵ متر شروع می‌شود.

این نیم‌رخ روی داده‌های مقطع عمقی این نیم‌رخ به ترتیب فیلتر Dewow و بهره AGC یا کنترل بهره خودکار (Automatic gain control) با حداکثر تقویت ۳۰۰ اعمال شده است. قنات در این نیم‌رخ در موقعیت ۲۰ متری و در عمق ۰/۵ متری اثر خود را به وضوح نشان می‌دهد. مرزهایی که مقطع GPR می‌تواند تحت اثر قنات نشان دهد در حالت ایده‌آل به ترتیب عبارت‌اند از خاک-سیمان، سیمان-هوا، هوا-آب، آب-سیمان، و در نهایت سیمان-خاک که در این نیم‌رخ این مرزها قابل شناسایی هستند. البته قدرت تفکیک روش GPR با توجه به عمق هدف و بسامد مورد استفاده در این برداشت، چندان زیاد نیست و اطمینان از اعتبار این لایه‌بندی را تا حدودی زیر سؤال می‌برد، ولی باز هم می‌توان این نمایش لایه‌بندی را به مثابه نتیجه‌ای قابل‌بررسی مورد توجه قرار داد. باید توجه داشت که رسانایی خاک‌های بالای قنات در نیم‌رخ‌های دیگر باعث تضعیف امواج شده و عمق نفوذ روی قنات را تا حدودی تحت تأثیر خود قرار داده است.

از ابتدای این نیم‌رخ تا فاصله ۷/۵ متری و نیز از موقعیت ۳۲ متری تا انتهای نیم‌رخ، عمق نفوذ نسبت به دیگر قسمت‌ها افزایش یافته و حتی تا عمق ۱/۶۰ متری نیز رسیده است. با توجه به این موضوع که فقط در اطراف قنات میزان رطوبت با دیگر قسمت‌ها متفاوت است،



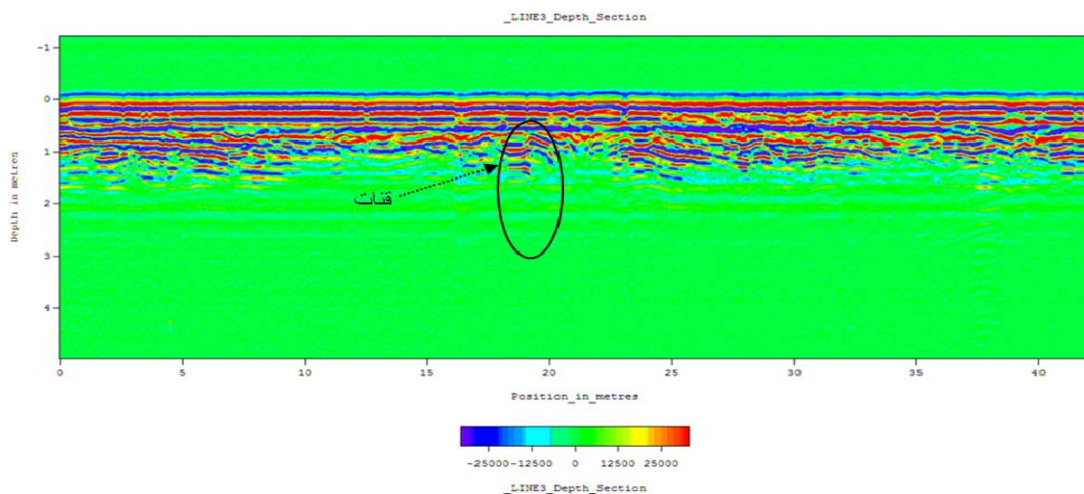
شکل ۳. مقطع عمقی نیم‌رخ ۱ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC.



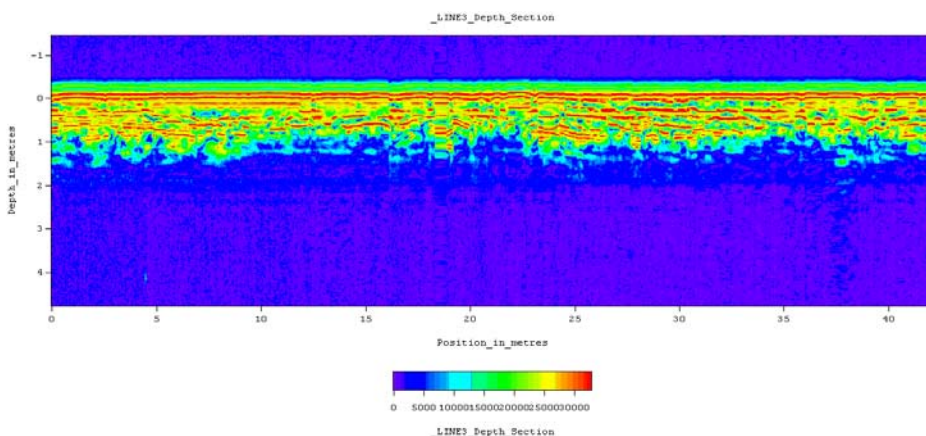
شکل ۴. مقطع عمقی نیم‌رخ ۱ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC و مشخصه پوش.

تا انتهای نیم‌رخ افزایش عمق نفوذ تا حدود ۱/۵۵ متری مشاهده می‌شود که نشان از افزایش ابعاد ذرات و کاهش رُس در این قسمت‌ها دارد. شکل ۶ مقطع این نیم‌رخ را با اعمال مشخصه پوش بر پردازش‌های قبلی نمایش می‌دهد. در این مقطع عمقی نیز مانند مقطع عمقی نیم‌رخ ۱ در شکل ۴ به هم‌ریختگی لایه‌بندی به‌وضوح قابل مشاهده است.

نکته جالب‌توجه در این نیم‌رخ، کاهش عمق نفوذ امواج GPR در اطراف قنات است که نشان از نفوذ آب از قنات به اطراف در این نیم‌رخ دارد. کاهش بیشتر عمق بررسی در سمت راست قنات که حتی به کمتر از ۰/۸۵ متر نیز می‌رسد، بیانگر نفوذ بیشتر آب و بالطبع نفوذپذیری بیشتر سنگ‌های سمت راست قنات نسبت به سمت چپ آن است. از ابتدا تا فاصله ۱۰ متری و نیز فاصله ۲۳ متری



شکل ۵. مقطع عمقی نیم‌رخ ۲ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC.

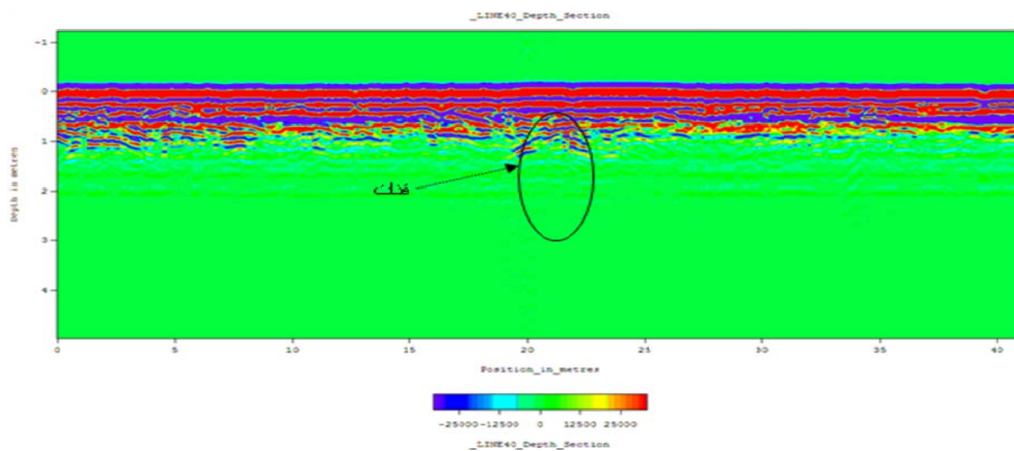


شکل ۶. مقطع عمقی نیم‌رخ ۲ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره AGC و مشخصه پوش.

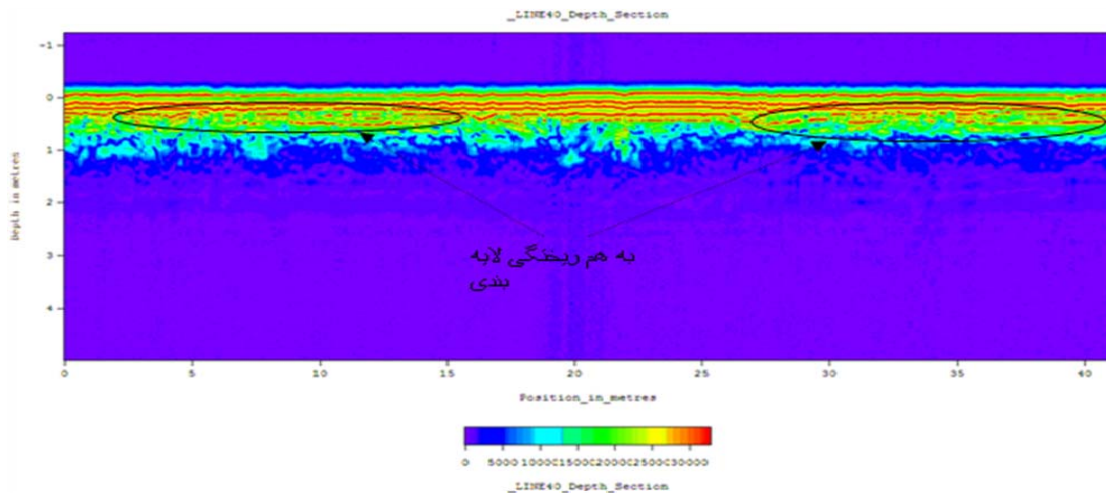
امواج GPR تا عمق بیشتری (حدود ۱/۱۵ متری) نفوذ کرده‌اند. دلیل این افزایش عمق نفوذ، افزایش ابعاد ذرات نیست.

مقطع عمقی نیم‌رخ ۳ با اعمال مشخصه پوش در شکل ۸ مشاهده می‌شود. این مقطع نیز به هم‌ریختگی لایه‌بندی در زیر زمین‌های کشاورزی را به وضوح نشان می‌دهد. در نیمه دوم این نیم‌رخ نیز به هم‌ریختگی لایه‌بندی مشاهده می‌شود که در بازدید مجدد از منطقه مشخص شد در این قسمت نیز زمین کشاورزی وجود داشته است که این زمین‌ها در هنگام برداشت داده‌ها بایر بودند.

شکل ۷ مقطع داده‌های رادار برای نیم‌رخ ۳ را نشان می‌دهد. این نیم‌رخ حدوداً ۷۰ متر بالاتر از نیم‌رخ ۲ قرار دارد. روی این نیم‌رخ فیلتر Dewow و بهره ثابت (Constant) ۲۰۰ اعمال شده است. به علت وضعیت توپوگرافی روی قنات این نیم‌رخ تصحیح توپوگرافی نیز صورت پذیرفت، با این حال قنات تا حدودی کشیده‌تر نشان داده شده است. نیمه اول این نیم‌رخ در زمین‌های کشاورزی اطراف قنات برداشت شد. به دلیل فعالیت‌های کشاورزی و جابه‌جایی خاک زیرسطحی در این قسمت، رطوبت خاک نسبت به نیمه دوم نیم‌رخ کمتر است و به همین دلیل با کاهش رطوبت،



شکل ۷. مقطع عمقی نیم‌رخ ۳ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره Constant.

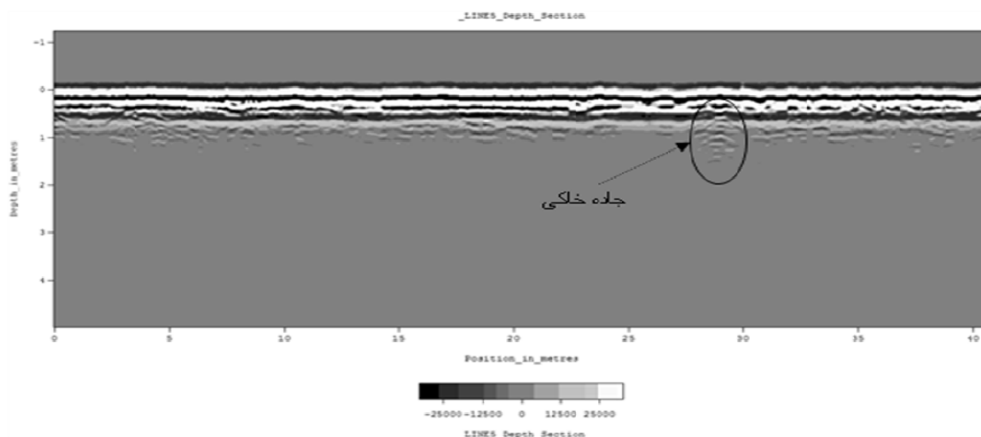


شکل ۸. مقطع عمقی نیم‌رخ ۳ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره خودکار و مشخصه پوش.

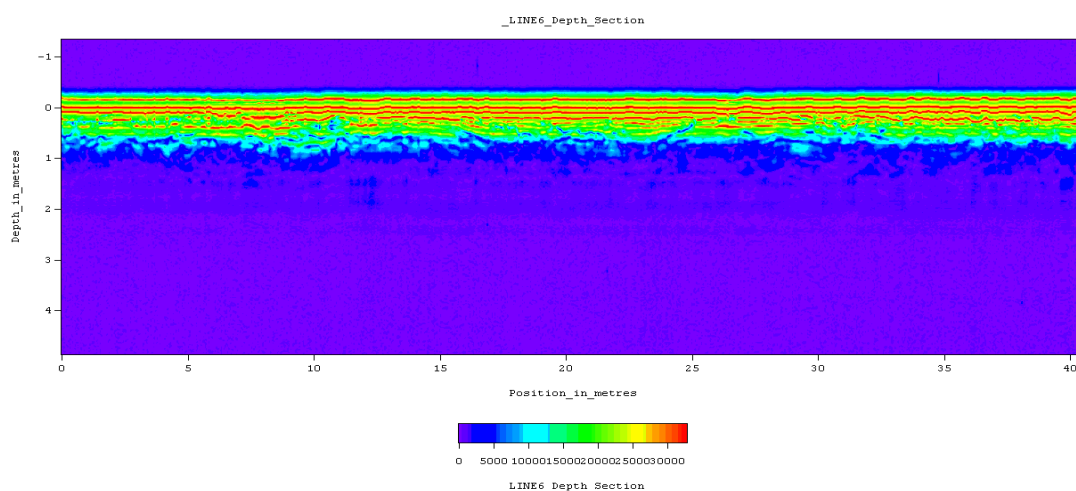
ذرات بر اثر عبور وسایط نقلیه، به وضوح قابل مشاهده است.

مقطع عمقی این نیم‌رخ با تصحیح صفر زمانی و اعمال مشخصه پوش در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، لایه اول زیرسطحی با ضخامت تقریباً ثابت ۹ سانتی‌متر از ابتدا تا انتهای نیم‌رخ کشیده شده است. لایه دوم نیز با ضخامت متوسط ۱۱ سانتی‌متر در زیر لایه اول قابل مشاهده است؛ به نحوی که در برخی قسمت‌ها محو شده و در برخی قسمت‌ها ضخیم‌تر می‌شود. در زیر این دو لایه، دو لایه دیگر نیز با وضوح کم قابل مشاهده است.

نیم‌رخ ۴ در فاصله بیشتری از مظهر قنات برداشت شد تا تأثیرات افزایش عمق قنات روی داده‌ها مشاهده شود. قنات در محل این نیم‌رخ در عمق حدودی ۱۸۰ سانتی‌متر قرار دارد. عمق نفوذ کم روش GPR در این نیم‌رخ که در شکل ۹ مشاهده می‌شود قادر به شناسایی قنات نیست. عمق نفوذ کم که اثر آن در این نیم‌رخ به وضوح قابل مشاهده است را باید به نوعی بزرگ‌ترین نقطه ضعف روش GPR دانست. مقطع عمقی داده‌های GPR برای این نیم‌رخ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره خودکار به دست آمده است. در این مقطع عمقی اثر جاده خاکی که نیم‌رخ آن را قطع کرده است به علت افزایش دانه‌بندی



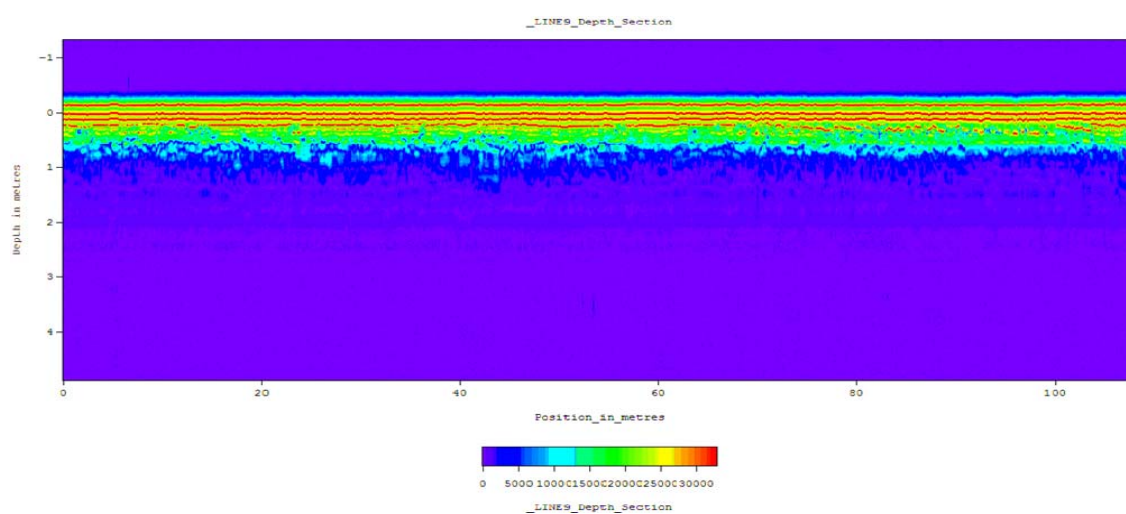
شکل ۹. مقطع عمقی نیم‌رخ ۴ با اعمال فیلترهای Dewow و استفاده از بهره خودکار. محل جاده خاکی روی این نیم‌رخ به وضوح مشخص شده است.



شکل ۱۰. مقطع عمقی نیم‌رخ ۴ با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره خودکار و مشخصه پوش.

یا نامشخص در زیر این دو لایه می‌توان شناسایی کرد. لایه اول با ضخامت یکسان ۱۰ سانتی‌متر از ابتدا تا انتهای نیم‌رخ دیده می‌شود. لایه دوم نیز در ابتدای نیم‌رخ با ضخامت ثابت ۱۱ سانتی‌متر تا فاصله ۷۰ متری نیم‌رخ وجود دارد و از این قسمت به بعد تا نزدیکی انتهای نیم‌رخ مرز شناسایی شده لایه دارای اغتشاش است و ضخامت آن در بعضی قسمت‌ها تا ۲۰ سانتی‌متر نیز زیاد می‌شود. لایه‌های دیگری را می‌توان در زیر این دو لایه به صورت مبهم مشاهده کرد.

پس از برداشت نیم‌رخ‌های عمود بر قنات که با هدف نمایش قنات صورت گرفت، یک نیم‌رخ دیگر با طول ۱۰۸ متر به موازات قنات برداشت شد. هدف از برداشت این نیم‌رخ بررسی دقیق‌تر قدرت روش GPR در نمایش لایه‌بندی زیرسطحی بود. بر روی مقطع عمقی این نیم‌رخ که در شکل ۱۱ قابل مشاهده است، فیلتر Dewow، بهره از نوع خودکار و در نهایت مشخصه پوش اعمال شده است. روی مقطع این نیم‌رخ، دو لایه به وضوح قابل تشخیص است و در ضمن یک یا دو لایه به صورت محو

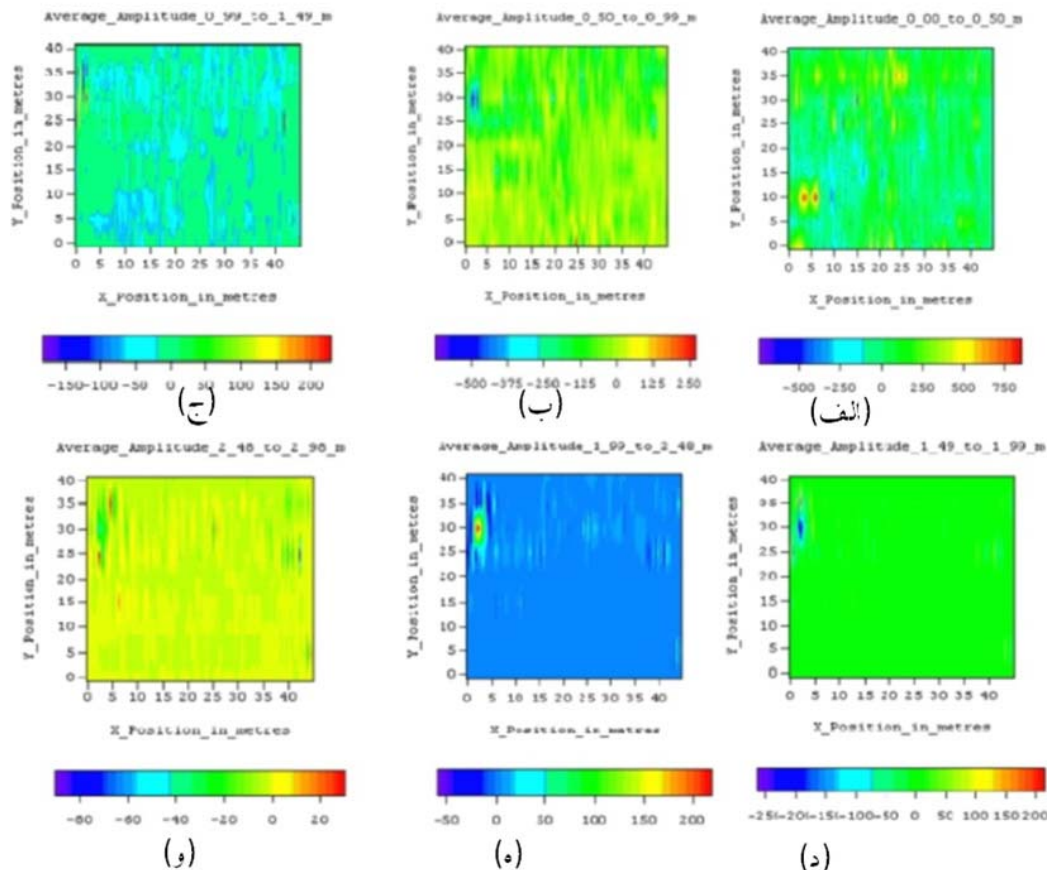


شکل ۱۱. مقطع عمقی نیم‌رخ عمود بر قنات با اعمال فیلتر Dewow و استفاده از بهره خودکار و مشخصه پوش.

استفاده شد. در مدل‌سازی به منظور برداشت نیم‌رخ‌ها، جهت X و مسیر قنات، که نیم‌رخ‌ها عمود بر آن برداشت شدند، جهت Y در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه طول هر نیم‌رخ ۴۰ متر بوده است و نیز حدود ۴۰ متر از قنات در این مدل‌سازی مورد بررسی قرار گرفت، شبکه مدل‌سازی یک شبکه ۴۰ × ۴۰ متر است.

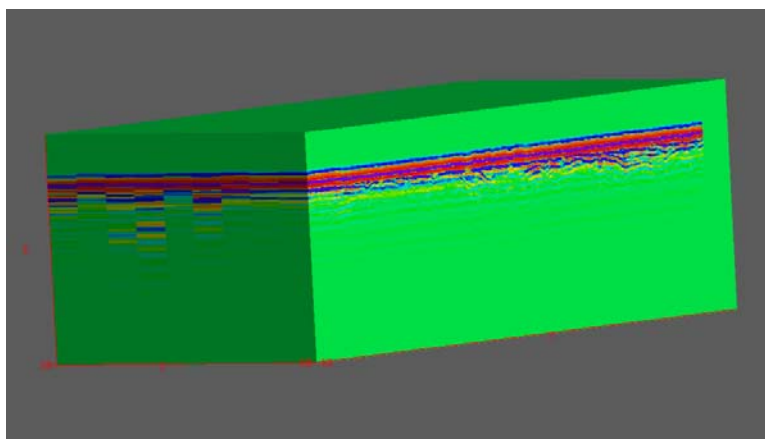
مقاطع عمقی منطقه برداشت که با استفاده از نرم‌افزار EKKO Mapper به دست آمده در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. برای به دست آوردن این مقاطع از پردازش‌های Dewow، مهاجرت (Migration) به ازای ۰/۱ متر بر نانوثانیه و در نهایت بهره خودکار استفاده شد.

پس از بررسی دوبعدی زمین با استفاده از مقاطع GPR، سعی شد تا با برداشت شبکه منظمی از نیم‌رخ‌ها مدل‌سازی سه‌بعدی GPR(3-D) نیز روی این محدوده صورت پذیرد. از آنجاکه همه ساختارهای زمین‌شناسی در طبیعت سه‌بعدی هستند، یک برداشت کاملاً سه‌بعدی با استفاده از یک مدل تفسیر سه‌بعدی می‌تواند به لحاظ نظری دقیق‌ترین جواب‌ها را بدهد (لوک، ۲۰۰۴). به منظور مدل‌سازی سه‌بعدی در فاصله ۴۰ متری نیم‌رخ‌های ۱ و ۲ و به فاصله ۵ متر از یکدیگر نیم‌رخ‌های موازی برداشت شد. در نهایت به منظور بررسی سه‌بعدی در این قسمت داده‌های ۹ نیم‌رخ GPR به دست آمد. برای نمایش سه‌بعدی این داده‌ها از نرم‌افزارهای EKKO-Mapper و EKKO-3D



شکل ۱۲. میانگین دامنه سیگنال برحسب عمق برای اعماق، (الف) ۰ تا ۰/۵، (ب) ۰/۵ تا ۰/۹۹، (ج) ۰/۹۹ تا ۱/۴۹، (د) ۱/۴۹ تا ۱/۹۹، (ه) ۱/۹۹ تا ۲/۴۸ و (و)

۲/۴۸ تا ۲/۹۸



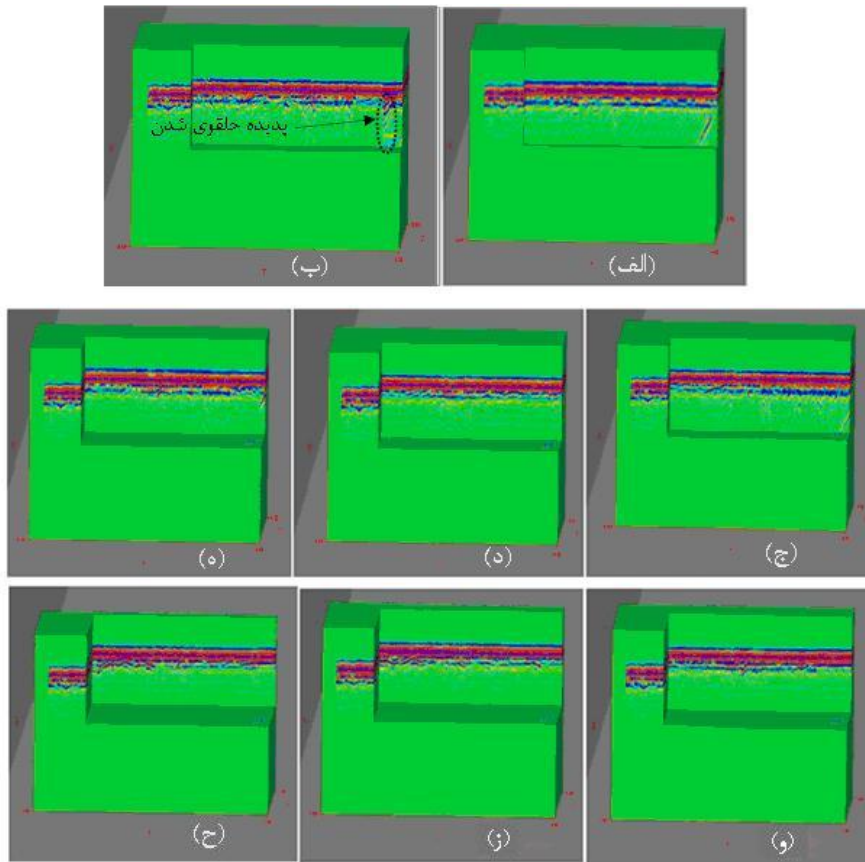
شکل ۱۳. مقطع سه‌بعدی (3D) داده‌های برداشت شده با استفاده از نرم‌افزار EKKO_3D.

استفاده از نرم‌افزار T3D نمایش داده شده است (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹c). برای نمایش این مقطع از فیلتر Dewow و بهره خودکار استفاده شده است.

در شکل ۱۴ نیز برش‌های عرضی مقطع EKKO_3D به نمایش درآمده است. نکته جالبی که توجه را به خود جلب می‌کند نفوذ بسیار زیاد قسمت‌های ابتدایی دو نیم‌رخ اول در این مقاطع است. در نیم‌رخ دوم حتی پدیده حلقوی شدن (Ringing) قابل مشاهده است، این پدیده در برداشت‌های GPR به دلایلی مانند نبود جفت‌شدگی (Coupling) مناسب آنتن رادار با زمین و برداشت بد داده‌ها یا وجود حفره‌های زیرسطحی، کابل‌ها و لوله‌های فلزی مدفون و همچنین در مرز خاک هوازده شده با هوازده نشده مشاهده می‌شود (زننگ و مک‌مگان، ۱۹۹۷). از آنجا که در این محل لوله و یا کابل وجود ندارد و برداشت نیز با دقت زیادی صورت گرفته است، این پدیده احتمال وجود حفره‌های هوا و یا خاک هوازده نشده در این بخش را نشان می‌دهد. در بازبینی منطقه مشخص شد که این قسمت در نزدیکی یک رودخانه فصلی قرار دارد و اثرات این رودخانه به طور محتمل باعث شستن لایه‌های خاک و ایجاد تخلخل می‌شود و این پدیده را به وجود می‌آورد.

این ۶ مقطع تا عمق تقریبی ۳ متر را مورد بررسی قرار داده است. میانگین دامنه سیگنال برای هر بخش از این شکل در بالای آن نوشته شده است. با توجه به بررسی‌های قبلی مشخص شد که قنات در عمقی در حدود ۰/۴ تا ۰/۹ متر قرار دارد. در نتیجه در تفسیر این مقاطع تمرکز روی شکل ۱۲-ب که میانگین دامنه سیگنال را برای عمق ۰/۹۹ - ۰/۵ متر نشان می‌دهد، گذاشته شد. در این مقطع اثر واضحی از قنات مشاهده نمی‌شود. دیگر مقاطع نیز حالتی مشابه با مقطع «ب» دارند. دلیل موفق نبودن این مقاطع در نمایش قنات را باید در نبود تباین کافی برای تفسیر به کمک نرم‌افزار دانست. نرم‌افزار EKKO Mapper در نمایش پدیده‌هایی چون لوله‌های فلزی که تباین زیادی با محیط اطراف خود دارند، موفق نشان می‌دهد (سنسورز و سافتور، ۱۹۹۹b). در این مقاطع فقط می‌توان به بررسی بعضی از قسمت‌ها که عمق نفوذ زیادی دارند و در مقاطع عمیق‌تر همچنان اثر خود را نشان می‌دهند (۵ - ۰ متری جهت x و ۳۵ - ۲۵ متری جهت y) اشاره کرد. این مناطق احتمالاً دارای دانه‌بندی با ابعاد ذرات بزرگ‌تر و نسبت رُس کمتری نسبت به دیگر قسمت‌ها هستند.

تفسیر سه‌بعدی داده‌های GPR با نرم‌افزار EKK_3D نیز صورت پذیرفت که مقطع سه‌بعدی آن در شکل ۱۳ با



شکل ۱۴. برش‌های عرضی از مقطع سه‌بعدی. به‌ترتیب از شکل (الف) تا (ح).

۵ نتیجه‌گیری

به‌واسطه حضور رطوبت و یا ذرات رسوبی ریزدانه نسبت به رسوبات درشت‌دانه است. دانستن این خاصیت و داشتن اطلاعات زمین‌شناسی کافی از منطقه مورد تحقیق کمک شایانی به بررسی و تعیین کیفی ابعاد ذرات دانه‌بندی رسوبی خاک زیرسطحی و برآورد میزان رُس در خاک زیرسطحی می‌کند.

آشکارسازی لایه‌های بسیار نازک موجود در عمق کم، در این تحقیق نشان‌دهنده قدرت تفکیک زیاد (در حد سانتی‌متر) روش GPR است و با توجه به سرعت برداشت و سهولت این روش استفاده از آن برای آشکارسازی ساختارها و لایه‌های زیرسطحی کم‌عمق مناسب به نظر می‌رسد. دلیل عمده قابل تشخیص بودن

با توجه به قدرت تفکیک زیاد روش GPR و همچنین، سرعت زیاد و سهولت برداشت در این روش، می‌توان گفت که روش GPR در بررسی و آشکارسازی اهداف زیرسطحی کم‌عمق مشابه حفره‌های زیرسطحی، قنات‌ها و اهداف دیگری که ثابت دی‌الکتریک متفاوتی با محیط اطراف خود دارند، روشی موفق است.

علاوه بر تأثیر بسامد امواج ارسالی از دستگاه GPR، عوامل دیگری همچون رطوبت خاک و وجود و میزان مواد رُسی ریزدانه یا به‌طور کلی ریزدانه بودن رسوبات، عمق بررسی یا نفوذ امواج GPR را کاهش می‌دهد که این امر عمدتاً ناشی از بالاتر بودن میزان رسانندگی الکتریکی

مجله ژئوفیزیک ایران، ۱(۱)، ۸۱-۸۹.

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

محمدی‌ویژه، م.، ۱۳۸۷، برداشت، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین در منطقه شاهرود و مقایسه آن با نتایج ژئوالکتریک در منطقه مزبور، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

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

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

Apparao, A., 1997, Development in geoelectrical methods, A. A. Balkema.

Blindow, N., Eisenburger, D., Illich, B., Petzold, H. and Richter, T., 2007, Ground penetrating radar, In Environmental Geology (Eds K.Knödel, G.Lange and H.-J.Voigt), Springer., 283-335.

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.

Knight, R., 2001, Ground penetrating radar for environmental applications, Annu. Rev. Earth Planet. Sci., 29, 229-255.

Knödel, K., Lange, G. and Voigt, H.-J., 2007, Environmental Geology, Springer.

Kofman, R., Ronen, A. and Fredman, S., 2006, Detection of model voids by identifying reverberation phenomena in GPR records, Journal of Applied Geophysics, 59, 284-299.

Loke, M. H., 2004, 2-D and 3-D electrical imaging surveys, www.Geoelectrical.com.

Morey, R. M., 1974, Continuous subsurface profiling by impulse radar, subsurface exploration for underground excavation and heavy construction, ASCE Specialty Conference, Henniker, New Hampshire, 213-

لایه‌ها یا مرز لایه‌های گوناگون با روش GPR، تفاوت یا تباین خواص الکتریکی (گذردهی نسبی و رسانندگی الکتریکی) بین لایه‌های متفاوت است. عوامل عدیده‌ای موجب متفاوت بودن خواص الکتریکی لایه‌های گوناگون می‌شود که از جمله مهم‌ترین آنها می‌توان به متفاوت بودن نوع و جنس رسوبات در لایه‌ها، دانه‌بندی و میزان رُس آنها و همچنین متفاوت بودن میزان رطوبت در لایه‌ها و سایر عوامل اشاره کرد.

تباین کم خواص الکتریکی قنات با محیط اطراف آن، سبب شده است تا قنات در مقاطع حاصل از مدل‌سازی سه‌بعدی داده‌های GPR به وضوح قابل آشکارسازی نباشد. با این حال خصوصیات دیگری از زیر سطح زمین در عمق کم، مانند اندازه یا ابعاد دانه‌بندی از نظر کیفی و وجود حفره‌های هوا در منطقه مورد بررسی، به‌خوبی با مقاطع GPR آشکارسازی شده‌اند.

همچنین نتایج حاصل از این تحقیق حاکی از آن است که نقطه ضعف اصلی این روش، عمق نفوذ کم آن به‌خصوص در مناطق رسوبی شامل رُس و رطوبت است.

تشکر و قدردانی

نگارندگان لازم می‌دانند از همه افرادی که در تسهیل و عملی شدن برداشت‌های صحرائی، همکاری داشته‌اند، به‌ویژه آقایان مهندس زارعی و مهندس کبیریان، قدردانی و تشکر کنند.

منابع

اویسی موخر، م.، قاسمی، و. و شاه‌نظری، ح.، ۱۳۸۴، مطالعات مغناطیسی و رادار بر روی طاق‌های عمارت تاریخی خسرو در شهر قصر شیرین، دوازدهمین کنفرانس ژئوفیزیک، ۱۳۲-۱۲۹.

اویسی موخر، م.، ۱۳۸۶، بررسی ساختار شکستگی سراب قنبر در جنوب شهر کرمانشاه با استفاده از روش رادار،

- 292-333.
Sensors and Software, 1999a, Win_EKKO User's Guide, Version 1.0.
Sensors and Software, 1999b, EKKO Mapper User's Guide, Veresion 2.0.
Sensors and Software, 1999c, Win_EKKO User's Guide, Version 1.0.
Van Dam, R. L. and Schlager, W., 2000, Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses, *Sedimentology*, **47**, 435-449.
Van Overmeeren, R. A., 1994, Georadar for hydrogeology, *First break*, **8**, 401-408.
Zeng, X. and McMechan, G. A., 1997, GPR characterization of buried tanks and pipes, *Geophysics*, **62**, 798-806.
232.
Neal, A., 2004, Ground penetrating radar and its use in sedimentology, principles, problems and progress. *Earth-science Reviews*, **66**, 261-330.
Parasnis, D. S., 1997, Principles of applied geophysics, 5th edition, Chapman and Hall.
Reynolds, J. M., 1997, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley & Sons Ltd.
Shafri, H. Z. M., Abdollah, R. S. A., Roslee, M. and Numiandy, R., 2008, Optimization for ground penetrating radar (GPR) mixture model in road pevement density data analysis, IGARSS, USA.
Stern, W., 1929, Versucheiner elektrodynamischen dickenmessung von gletschereis, *Gerl. Beitr. Zur Geophysik*, **23**,