



Research Paper

Identifying Subsurface Cavities and Fractures in Roads Using the Ground Penetrating Radar With Two 170-and 600-MHz Central Antennas: A Case Study in Iran



*Shamseddin Esmaili¹ , Mehdi Bolbolvand², Mohsen Ahmadzadeh Irandoust³ , Mohammad Talebi^{2, 4}

1. Department of Sciences, Faculty of Physics, Razi University, Kermanshah, Iran.
2. Tehran Disaster Mitigation and Management Organization (TDMMO), Tehran, Iran.
3. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology (SUSTech), Shenzhen, China.
4. International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran.

Use your device to scan
and read the article online



Citation Esmaili, Sh., Bolbolvand, M. Ahmadzadeh Irandoust, M., & Talebi, M. (2025). Identifying Subsurface Cavities and Fractures in Roads Using the Ground Penetrating Radar With Two 170-and 600-MHz Central Antennas: A Case Study in Iran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(3):344-363. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.985.1985.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.985.1>

ABSTRACT

Background and Objective This study aimed to investigate the effectiveness of ground-penetrating radar (GPR) for identifying subsurface cavities and fractures in roads.

Method Data were collected using a GPR system (model 1760, ImpulseRadar Co., Sweden), which had two central antennas with frequencies of 170 and 600 MHz. Data acquisition was carried out in three areas: A road under construction in the Gachsaran Formation, a section of an asphalt-paved street in Ilam province, and an area including an old, small, buried tunnel in Kermanshah City. The geology of these areas is different and ranges from the Gachsaran Formation to Holocene sediments. The distance determined for the data acquisition step was 4 centimeters. The wave penetration depth in both antennas varied by geology type in these areas. The data after different processing steps were examined using wave-spectrum analysis, characteristics, and evidence of anomalies to distinguish cavities and fractures.

Results After performing all the processing steps, the results confirmed the presence of cavities and fractures. Also, the high agreement in the overlapping areas between the two antennas was clearly visible.

Conclusion Since choosing the appropriate antenna frequency for GPR plays a key role in the ability to properly detect the electrical properties of materials, the results show the proper efficiency of the GPR method with the aforementioned antennas in identifying subsurface cavities and fractures in roads.

Keywords Georadar, Subsurface drilling, Multi-frequency antenna, Signal processing, Roads and passages

Article Info:

Received: 10 Aug 2025

Accepted: 18 Sep 2025

Available Online: 01 Oct 2025

* Corresponding Author:

Shamseddin Esmaili, Assistant Professor.

Address: Department of Sciences, Faculty of Physics, Razi University, Kermanshah, Iran.

Tel: +98 (918) 3034470

E-mail: s.esmaili@razi.ac.ir



Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

English Version

Introduction

Today, identifying subsurface discontinuities such as cavities and fractures in roads and passages is considered one of the important challenges (Bendetto et al., 2017). These discontinuities can reduce the resistance of road structures, cause collapses, create dangerous subsidence and surface depressions that give the roadway an unsightly appearance and generate high costs for roadway repairs. One of the issues that challenges the construction and maintenance of this type of infrastructure is the lack of sufficient knowledge of the subsurface layers, which sometimes causes extensive damage during construction or operation. Conventional methods for identifying subsurface discontinuities are often destructive and based on drilling and sampling, which, despite their high reliability, are costly and time-consuming. Therefore, geophysical methods can be used for road studies due to being cost-effective and time-efficient (Hosaini et al., 2017). Among these geophysical methods, ground-penetrating radar (GPR) is of great importance due to its high accuracy and speed, and non-destructiveness. It is considered one of the electromagnetic methods (Slob et al., 2010). The use of high-frequency electromagnetic waves for subsurface exploration dates back to 1904 when Hulsmeier, a German inventor, invented a radar device (Parasnis, 1997). The use of radar became popular in 1956 and was developed more widely from 1970 onwards. GPR is able to detect changes in the electrical properties of materials. However, the selection of the appropriate antenna frequency is considered to be one of the key parameters in the success of this method (Daniels, 2004).

Although several studies have investigated the effectiveness of GPR in identifying subsurface discontinuities, systematic comparison of the capabilities of antennas with different frequencies (especially 170 and 600 MHz) in environments with different soil types, as well as targeted processing and wavefront spectrum analysis for optimal interpretation to distinguish between types of discontinuities, requires further research. Therefore, this study aims to investigate the capability of GPR with 170- and 600-MHz antennas in detecting subsurface cavities and fractures.

Materials and Methods

Ground penetrating radar

The GPR method is the most widely used geophysical shallow technique that requires high-resolution accuracy (Annán, 2009). The basis of this method is the reflection of electromagnetic waves at the boundary of layers with different resistivity and magnetization. In this method, the radio waves are generated by special transmitters (antennas) and, after penetrating into the ground and reflecting from the boundary of the layers, are recorded by inductive receivers. Since the transmitter and receivers are mounted side by side on a portable setup, the data acquisition speed in this method is very high. The accuracy of this method ranges from a few centimeters to several meters, depending on the frequency of the antenna used. Ground-based radar operates by transmitting electromagnetic waves (10-1000 MHz) into the ground and receiving reflected pulses when encountering discontinuities (Ahmadi et al., 2014). The discontinuity can be a boundary between layers, an impurity, boundary between materials with different dielectric properties, a buried object (e.g. pipe) or delamination of that cross section (Figure 1). The amplitude of the received echoes and their corresponding arrival times can be used for subsurface modeling to determine the nature and location of the discontinuity.

Compared to other non-destructive techniques such as infrared, ultrasonic, or microwave thermography, GPR offers greater penetration power and can therefore model at greater depths. High-frequency antennas (800 MHz and above) are used in shallow areas (<2 m depth) to achieve high accuracy, while lower-frequency antennas (300, 250, 100, and 50 MHz) are used for deeper depths.

GPR is a real-time method that uses high-frequency radio waves to acquire data at very high velocity and resolution (Neal, 2004). Changes in the velocity of wave propagation due to differences in the electrical properties of materials will result in differences in the time it takes for the waves to travel and return. As the antennas move along the survey line, they collect a time series of received data at specific points along the line. These time series are then combined to create a subsurface scan view. Figure 2 shows a schematic diagram of the GPR wave propagation and recording. The data is recorded in specific formats. After going through various processing steps, this information is transformed into georadar sections that are used to identify various targets.

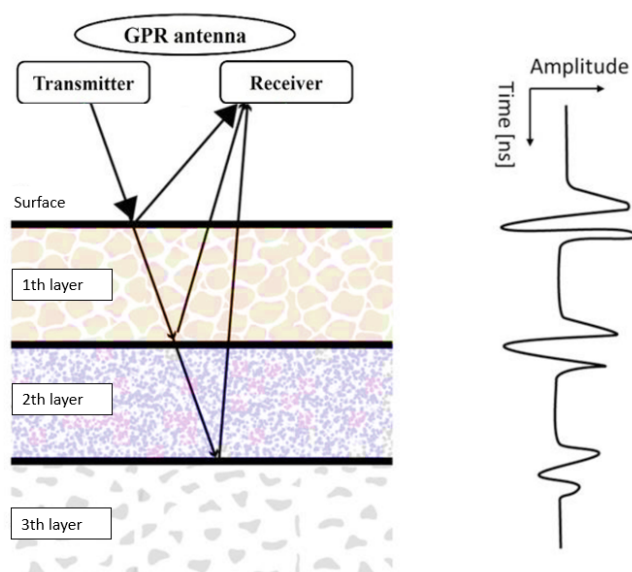


Figure 1. Schematic diagram of the GPR method in a 3-layer ground cross-section: Transmitted and received radar signals from the layers (left) and speedometer timeline history (right)

Data collection and study area

In this study, data were collected in designated sections within the target areas using a radar (model 1760, ImpulseRadar Co., Sweden), shown in Figure 3. This model has two antennas with frequencies of 170 and 600 MHz. The data collected with this tool, with high resolution, al-

lows us to identify layers, cavities, and fractures near the surface (<12 meters) (Goodman & Piro, 2013).

Data collection was carried out in three areas, including a road under construction (first area), an asphalt-covered street and road (second area), and the road on a small old tunnel (third area). Figure 4 shows a satellite image of the

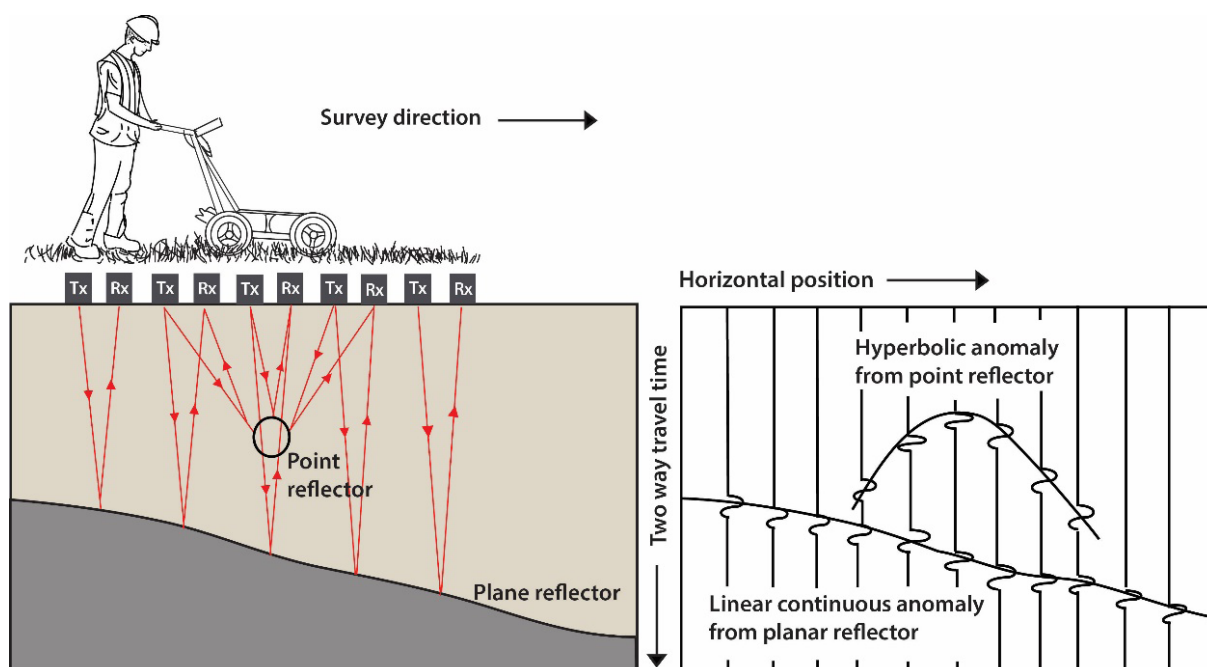


Figure 2. Schematic diagram of GPR wave generation and recording (left) and recorded signals in a survey direction (right). Tx= Transmitter, and Rx= Receiver.



Figure 3. The used GPR device

selected areas as well as a view of the profiles taken in these areas. These areas were selected in such a way that the cavities and fractures in them were visible or obvious. Geologically, these areas contain Holocene sediments. Two areas were in Ilam Province and one area on the outskirts of Kermanshah City, all of which were located in the Zagros geological zone. The road under construction was

in the Gachsaran Formation. One of the characteristics of this Formation is its high susceptibility to erosion, especially erosion caused by water. This formation consists of more than 500 meters of alternating red to blue-gray gypsum and marl, interbedded with cream-colored marly limestone. In fact, the dissolution rate of these materials is much higher than other rocks. Accordingly, karsts, cavi-

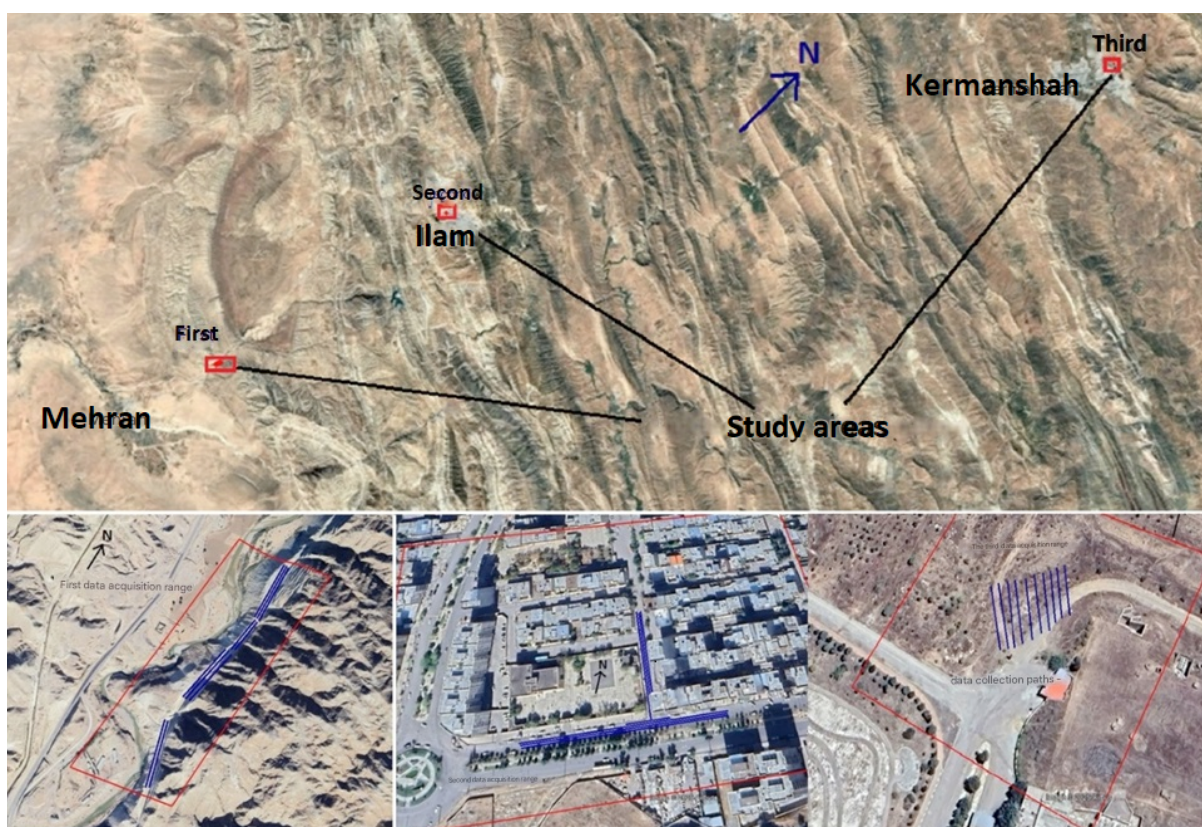


Figure 4. A satellite image of the study areas (upper) and survey lines (blue lines) in each study area (lower)



Figure 5. Image of the study areas: The road under construction (upper), the asphalt-covered road with cavities (lower right), and the road on a small old tunnel (lower left)

ties, frequent fractures, foliation, and spongy conditions in areas close to the surface are observed in this formation. Figure 5 shows the study area and the cavities and fractures on the surfaces.

Data processing

In this study, data acquisition was performed with two antennas with center frequencies of 170 and 600 MHz

and a horizontal sampling distance of 4 cm. Reflexw and CrossPoint were used to process the data. The data processing steps included automatic gain control (AGC), bandpass filtering, Dewow filtering, static correction, subtract-DC-shift, and background removal. It should be noted that after data processing, only the results of the identified anomalies are presented. The values of the parameters used in different stages of data processing are

Table 1. Values of the parameters used in different steps of data processing

Processing	Value	Unit
AGC	55-300	Nanosecond
bandpass filtering	42-350 (Antenna 170 MHz) 150-950 (Antenna 600 MHz)	MHz
Dewow filtering	10 (Antenna 170 MHz) 3 (Antenna 600 MHz)	Nanosecond
Static correction	First received	-
Subtract-DC-shift	Removing the mean	-
Background removal	1-2 (Antenna 170 MHz) 2-6 (Antenna 600 MHz)	Meter

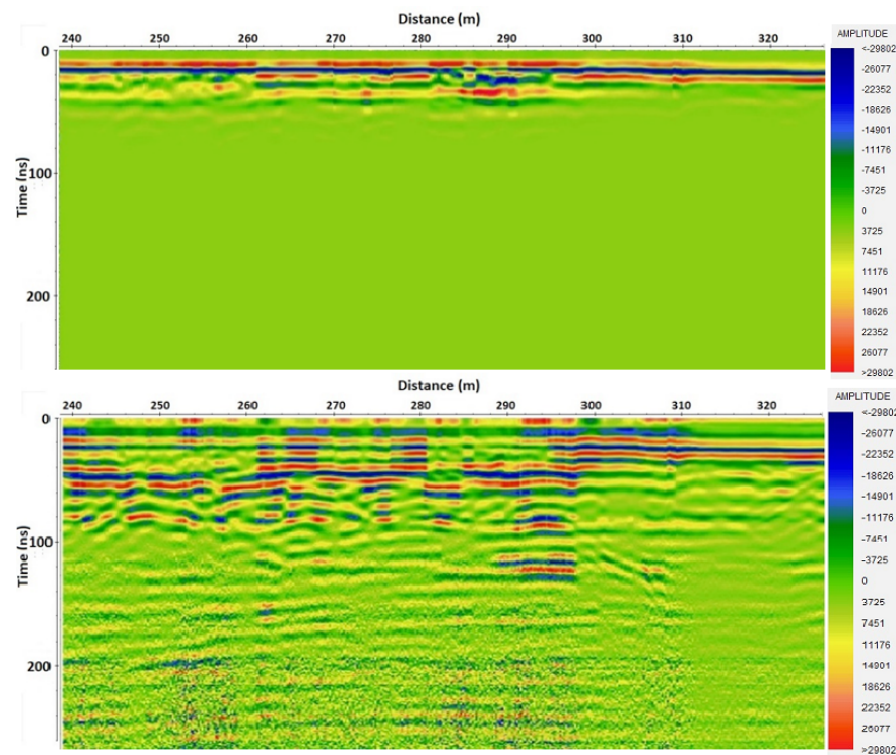


Figure 6. A sample of data before (upper image) and after applying the processing steps (lower image)

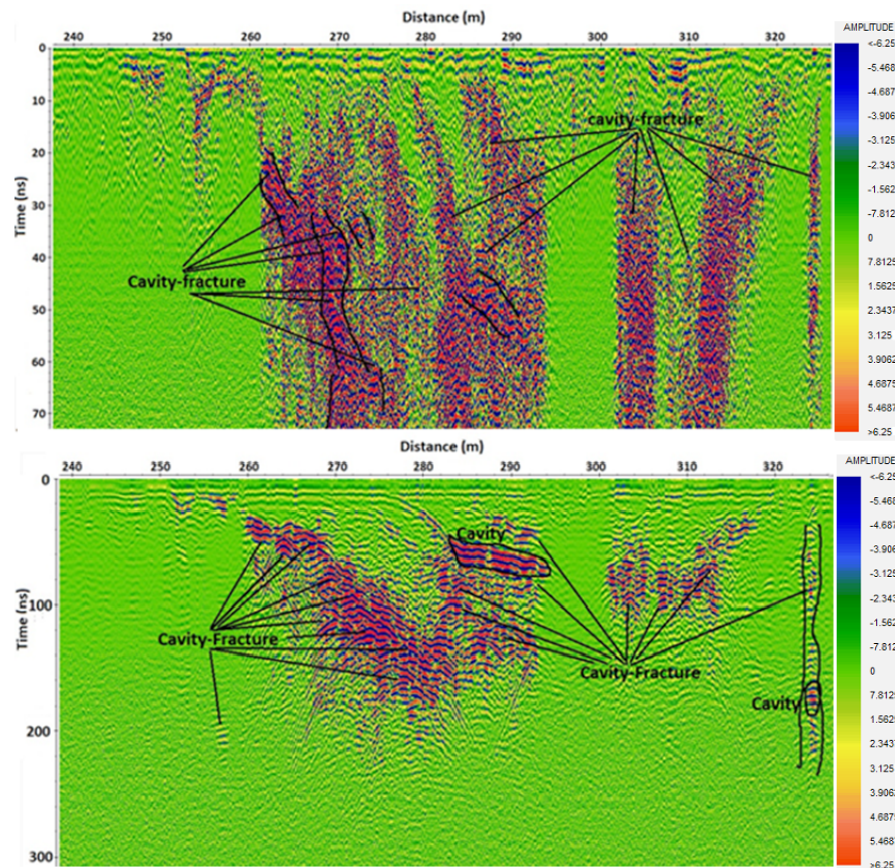


Figure 7. Results obtained for processed data from the first study area for two antennas of 600 MHz (upper image) and 170 MHz (lower image)

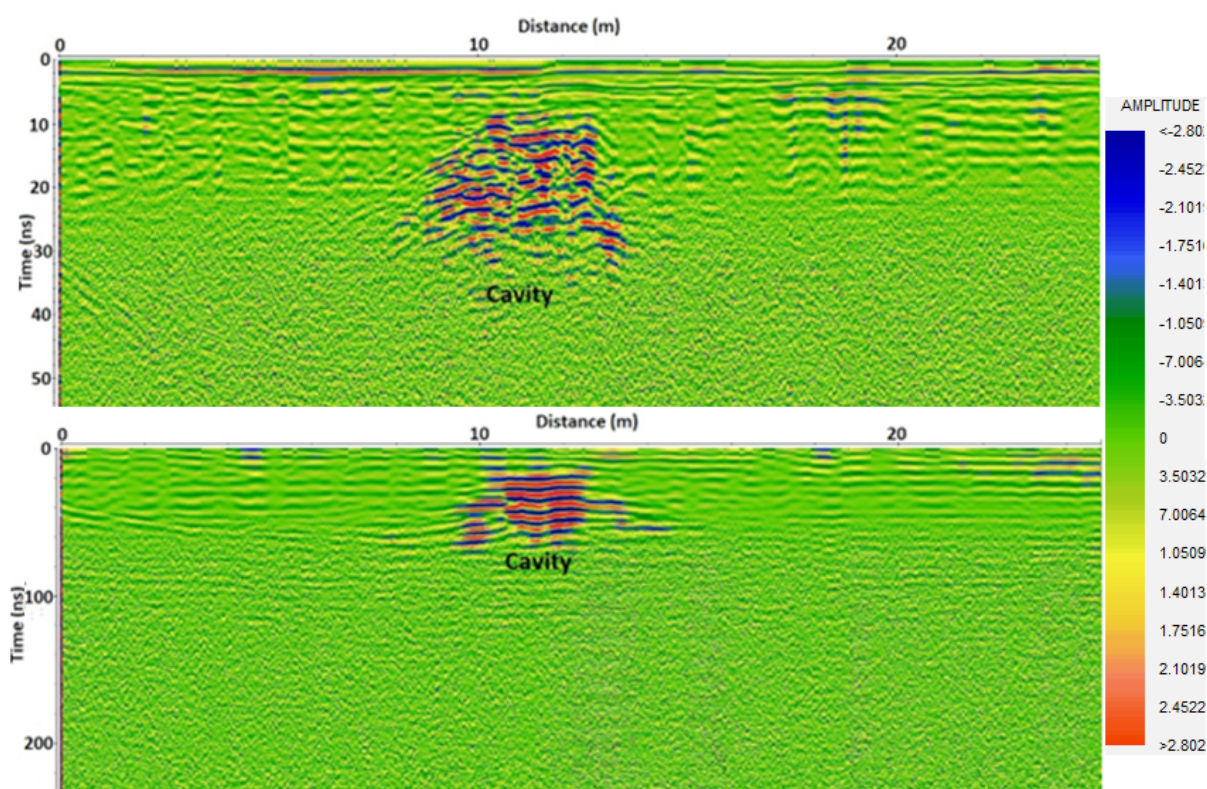


Figure 8. Results obtained for processed data from the second study area for two antennas of 600 MHz (upper image) and 170 MHz (lower image)

presented in Table 1. Figure 6 shows an example of the data obtained before and after processing.

Data analysis

After data processing, velocity analysis and wave spectrum analysis were performed, taking into account the characteristics of subsurface cavities and fractures in the GPR data, as well as examining the reflection coefficient and phase of the waves returning from the anomalies observed in the data, and the results were interpreted.

Results

Figure 7 shows the results of the processed data for the first study area using both the 600 and 170 MHz antennas. In this figure, the location of the cavities and fractures is depicted. The results indicate the presence of many cavities with different dimensions from one meter to several meters, which are located along the fractures (crushed area) and in combination with them. Due to the large number of small cavities in this area, only large cavities and fractures are shown in Figure 7. The area with these discontinuities is also shown well and with high resolution. The results obtained using the 600 MHz antenna

show more detail in the near-surface region and confirm the extension of the region to the ground surface.

Figure 8 shows the results after data processing for the second area, which was an asphalt-paved street with subsurface cavities. By using both the 600 and 170 MHz antennas, the presence of a cavity in the area was evident. It should be noted that the data in this area were collected in different parallel lines with a distance of one meter from each other, and the best profile for detecting the cavities was selected and presented. The void identified in these data is close to the surface and is in complete agreement with field observations. The cavities along the profile line were about 3 meters in length and about 1 meter in height.

For the third study area, where a small old buried tunnel is located, the results are shown in Figure 9 using both the 600- and 170-MHz antennas. In this survey, after finding the area and route of the tunnel, 15 profile lines were surveyed perpendicular to the possible road, with a distance of 3 meters from each other. In most of the results obtained for these profiles, the location of the tunnel was clearly visible. However, in two of these profiles, the anomaly related to the tunnel was lower, which could indicate local filling of the tunnel. Given that the tunnel was relatively deep (6-7 m depths), its presence was vis-

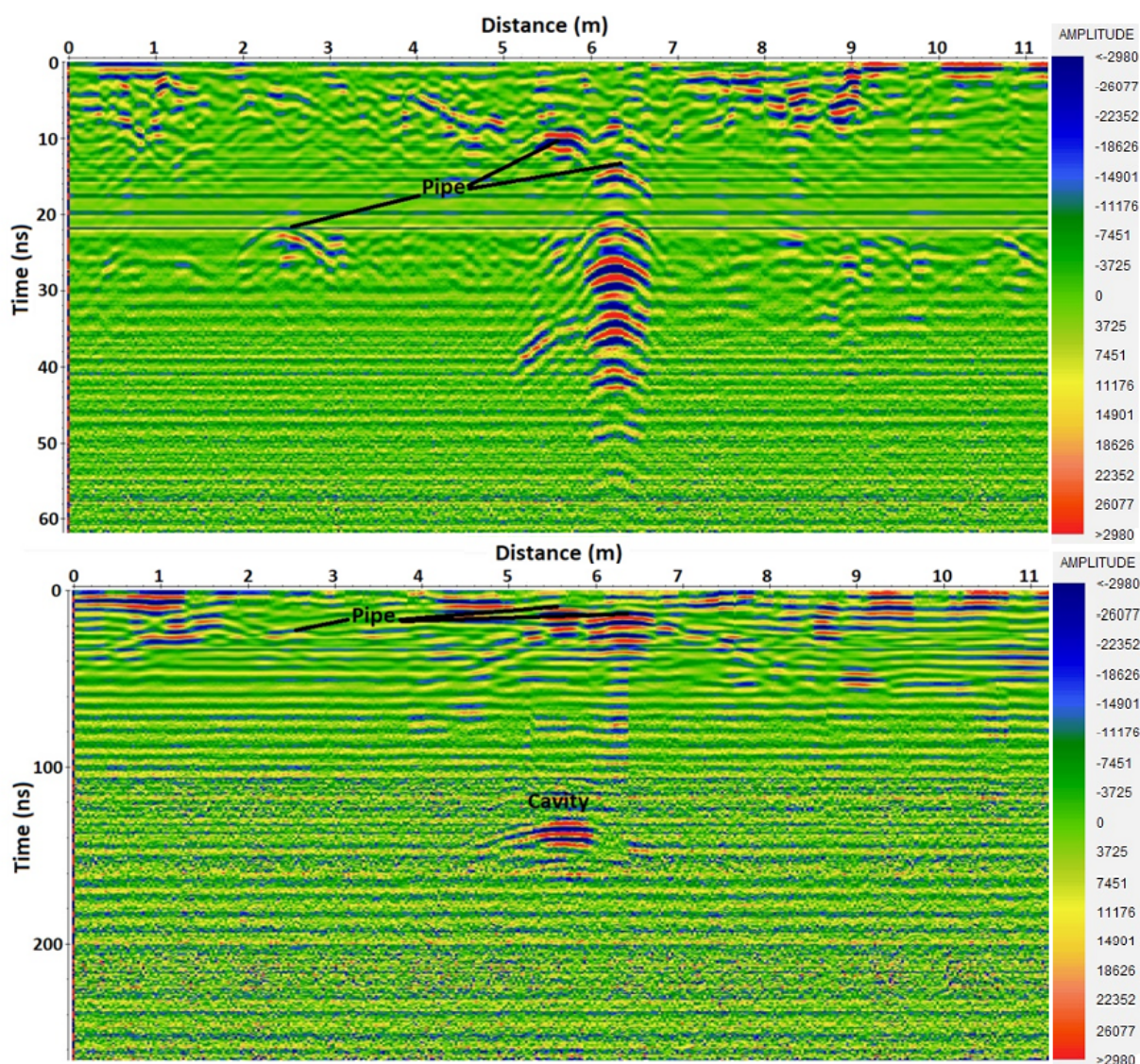


Figure 9. Results obtained for processed data from the third study area for two antennas of 600 MHz (upper image) and 170 MHz (lower image)

ible using the 170-MHz antenna. It should be noted that there were also underground facilities in this area, including several pipes, the image of which is well defined in the results using the 600-MHz antenna. Considering the profile passing in a direction almost perpendicular to the identified route for the tunnel, the tunnel cavity was about 80 centimeters in width and about 1 meter in height.

Conclusion

In this research, using a GPR device with two antennas with central frequencies of 170 and 600 MHz, subsurface studies of three areas with evidence of cavities and fractures were conducted. The first study area was in the Gachsaran Formation; it was a road under construction in Ilam Province. The second area was an asphalt-paved

street in Ilam Province. The third study area was in Kermanshah City; the area was a road on a small, old tunnel that was buried decades ago. All three areas had different dimensions, depths of placement, and geological conditions of the cavities, allowing the efficiency of the GPR method to be evaluated using 600- and 170-MHz antennas. Both antennas were used to collect data at their best penetration depth; for near the surface (<3-m depth) the 600-MHz antenna was used, while for greater depth (<14 meters) the 170-MHz antenna was used. The results from all three areas, after data processing and analysis, confirmed the presence of cavities and fractures at varying depths and dimensions. Overall, the results revealed the high capability of the GPR method to identify cavities and fractures, and, consequently, the presence of areas prone to collapse.



Ethical Considerations

Compliance with ethical guidelines

There were no ethical considerations to be considered in this research.

Funding

A part of the data collection in this study was carried out with financial support from the [General Directorate of Roads and Urban Development of Ilam Province](#).

Authors' contributions

All authors contributed equally to the conception and design of the study, data collection and analysis, interpretation of the results, and drafting of the manuscript. Each author approved the final version of the manuscript for submission.

Conflicts of interest

The authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge [Tehran Disaster Mitigation and Management Organization \(TDM-MO\)](#) and [Razi University](#), Kermanshah, Iran, for their help in providing research documents and methodological aspects of the job.



مقاله پژوهشی

شناسایی حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی در راه‌ها و معابر به روش ژئورادار و با استفاده از آنتن‌های مرکزی ۱۷۰ و ۶۰۰ مگاهرتز

شمس‌الدین اسماعیلی^۱، مهدی بلبوند^۲، محسن احمدزاده ایران‌دوست^۳، محمد طالبی^۴

۱. گروه علوم، دانشکده فیزیک، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران.

۲. سازمان پیشگیری و مدیریت بحران شهر تهران، تهران، ایران.

۳. گروه علوم زمین و فضا، دانشگاه علوم و فناوری جنوبی ساسک، شنزن، چین.

۴. پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران.

Use your device to scan and read the article online



Citation Esmaeili, Sh., Bolbolvand, M., Ahmadzadeh Irandoust, M., & Talebi, M. (2025). Identifying Subsurface Cavities and Fractures in Roads Using the Ground Penetrating Radar With Two 170-and 600-MHz Central Antennas: A Case Study in Iran. *Disaster Prevention and Management Knowledge*, 15(3):344-363. <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.985.1985.1>

doi <https://doi.org/10.32598/DMKP.15.3.985.1985.1>

چکیده

زمینه و هدف: این پژوهش به بررسی کارایی روش ژئورادار در شناسایی حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی در راه‌ها و معابر پرداخته است. **روش:** به‌منظور برداشت داده‌ها از دستگاه ژئورادار شرکت ایمپالس-رادار مدل ۱۷۶۰ که دارای آنتن‌های با فرکانس مرکزی ۱۷۰ و ۶۰۰ مگاهرتز است، استفاده شد. داده‌برداری در سه منطقه شامل یک جاده در دست احداث، بخشی از یک خیابان و یک محدوده شامل تونلی زیرسطحی و قدیمی با ابعاد کوچک انجام شد. زمین‌شناسی این محدوده‌ها متفاوت و از نوع سازند گچساران تا خاک‌های عهد حاضر است. فاصله تعیین‌شده برای گام داده‌برداری نیز ۴ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. عمق نفوذ امواج در هر دو آنتن در محدوده‌های مختلف، باتوجه‌به نوع زمین‌شناسی ناحیه متفاوت بوده است. محدوده‌های در نظر گرفته‌شده دارای رخنمون حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی بوده و از آن‌ها به‌عنوان شواهدی در تأیید یا رد نتایج استفاده شده است. داده‌های برداشت‌شده پس از انجام مراحل مختلف پردازش، از نظر تحلیل طیف موج‌بری و ویژگی‌ها و شواهد وجود آنومالی‌ها برای تمایز حفرات و شکستگی‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

یافته‌ها: پس از انجام کلیه مراحل پردازش و تفسیر داده‌ها، نتایج به‌دست‌آمده به‌خوبی حضور حفرات و شکستگی‌ها را در داده‌های برداشت‌شده آشکارسازی نموده است. همچنین تطبیق بالای مناطق همپوشانی داده‌ها در هر دو آنتن به‌وضوح قابل‌مشاهده است.

نتیجه‌گیری: از آنجایی که انتخاب فرکانس مناسب آنتن نقشی کلیدی در توانایی تشخیص مناسب خواص الکتریکی مواد در روش ژئورادار دارد، نتایج حاصله کارایی قابل‌توجه این روش با آنتن‌های مذکور را در شناسایی حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی موجود در راه‌ها و معابر نشان می‌دهند.

کلیدواژه‌ها: ژئورادار، حفره‌یابی زیرسطحی، آنتن چندفرکانسی، پردازش سیگنال، معابر و راه‌ها

اطلاعات مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۹ مرداد ۱۴۰۴

تاریخ پذیرش: ۲۷ شهریور ۱۴۰۴

تاریخ انتشار: ۰۹ مهر ۱۴۰۴

* نویسنده مسئول:

دکتر شمس‌الدین اسماعیلی

نشانی: کرمانشاه، خیابان دانشگاه، دانشگاه رازی، دانشکده علوم، گروه فیزیک.

تلفن: ۳۴۳۰۴۷۰ (۹۱۸) +۹۸

پست الکترونیکی: s.esmaeili@razi.ac.ir

Copyright © 2025 The Author(s);

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY-NC: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode/en>), which permits use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited and is not used for commercial purposes.

مقدمه

امروزه شناسایی ناپیوستگی‌های زیرسطحی مانند حفرات و شکستگی‌ها در راه‌ها و معابر به‌عنوان یکی از چالش‌های مهم در مبحث شریان‌های حیاتی مطرح است (بندتو و همکاران، ۲۰۱۷). این ناهنجاری‌ها می‌توانند موجب کاهش مقاومت سازه‌های راه‌سازی، فروریزش‌ها، ایجاد فرونشست‌های خطرناک، نشست‌ها و فرورفتگی‌های سطحی شوند که چهره نامناسبی از معابر را عرضه و هزینه‌های زیادی را برای اصلاح گذرها ایجاد می‌کنند. یکی از مسائلی که ساخت و نگهداری این دسته از زیرساخت‌ها را دچار چالش می‌کند، عدم شناخت کافی از لایه‌های زیرسطحی است که بعضاً در مدت ساخت و یا در زمان بهره‌برداری، سبب ایجاد خسارت‌های فراوان می‌شود. روش‌های متعارف شناسایی این ناهنجاری‌ها اغلب از نوع مخرب و مبتنی بر حفاری و نمونه‌برداری هستند که علی‌رغم قابلیت اطمینان بالا، هزینه‌بر و زمان‌بر می‌باشند.

براین اساس امروزه می‌توان با صرف هزینه و زمان مقرون به صرفه، از روش‌های ژئوفیزیکی برای مطالعات راه‌ها بهره گرفت (حسینی و همکاران، ۲۰۱۷). در میان روش‌های ژئوفیزیکی پرکاربرد، رادار نفوذی به زمین با توجه به دقت و سرعت مناسب، غیر مخرب بودن و عملیات ساده در برداشت داده‌ها، از اهمیت بالایی برخوردار است. رادار نفوذی به زمین از جمله روش‌های الکترومغناطیسی محسوب می‌شود (اسلوب و همکاران، ۲۰۱۰). استفاده از امواج الکترومغناطیسی فرکانس بالا برای پی‌جویی‌های زیرسطحی به سال ۱۹۰۴ میلادی و اختراع هولسمیر^۱ آلمانی برمی‌گردد (پاراسنیس، ۱۹۹۷). سپس استفاده از این ابزار در سال ۱۹۵۶ رواج یافت و از سال ۱۹۷۰ به بعد به شکل گسترده‌تری توسعه پیدا نمود.

این روش قادر است تغییرات در خواص الکتریکی مواد را تشخیص دهد. باین حال، انتخاب فرکانس مناسب آنتن به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در موفقیت این روش محسوب می‌شود (دنیلز، ۲۰۰۴). مطالعات متعددی به بررسی کارایی ژئورادار در شناسایی ناهنجاری‌های زیرسطحی پرداخته‌اند، اما مقایسه سیستماتیک قابلیت‌های آنتن‌هایی با فرکانس‌های مختلف (به‌ویژه ۱۷۰ و ۶۰۰ مگاهرتز) در محیط‌هایی با جنس خاک متفاوت و همچنین پردازش هدفمند و بررسی ویژگی‌ها در کنار تحلیل طیف موجبری جهت تفسیر بهینه برای تمایز بین انواع ناپیوستگی‌ها نیاز به پژوهش بیشتری دارد. در این پژوهش سعی شده است قابلیت این روش با آنتن‌های مذکور در آشکارسازی حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی بررسی شود. این مقاله در پنج بخش ارائه شده است: پس از مقدمه، بخش دوم به مبانی روش تحقیق اختصاص دارد. بخش سوم به ارائه عملیات برداشت داده‌ها

و در بخش چهارم نتایج حاصل از پردازش داده‌ها مورد بحث قرار گرفته‌اند. در بخش پنجم نیز نتیجه‌گیری ارائه شده است.

روش

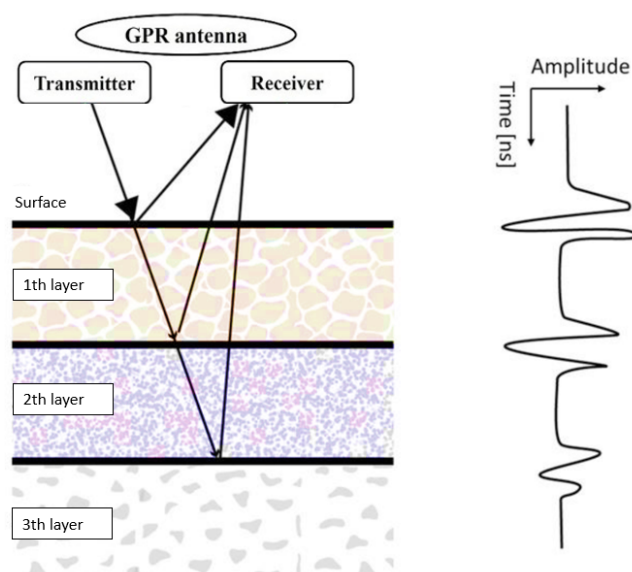
مبانی روش رادار نفوذی به زمین (ژئورادار)

روش ژئورادار پرکاربردترین تکنیک ژئوفیزیکی در مطالعات کم عمق است که به دقت تفکیک بالا نیاز دارند (آنان، ۲۰۰۹). مبنای این روش بازتاب امواج الکترومغناطیسی در مرز لایه‌هایی با مقاومت ویژه و مغناطیدگی متفاوت است. در این روش امواج توسط فرستنده‌های مخصوص (آنتن) تولید می‌شوند و پس از نفوذ به درون زمین و بازتاب از مرز لایه‌ها توسط گیرنده‌های القایی ثبت می‌شوند. از آنجایی که فرستنده و گیرنده‌ها در یک مجموعه قابل حمل در کنار یکدیگر نصب شده‌اند، سرعت داده‌برداری در این روش بسیار بالاست. دقت این روش بسته به فرکانس آنتن مورد استفاده از محدوده چند سانتی‌متر تا چندین متر است. رادار زمینی با انتقال امواج الکترومغناطیسی (در محدوده ۱۰۰۰ ~ ۱۰ مگاهرتز) به داخل زمین و دریافت پالس‌های منعکس شده هنگام مواجه شدن با ناپیوستگی‌ها عمل می‌کند (احمدی و همکاران، ۲۰۱۴). ناپیوستگی می‌تواند مرز لایه‌ها، ناخالصی، رابط بین مواد با دی الکتریک مختلف و یا یک جسم مدفون زیرسطحی مانند یک لوله یا لایه لایه شدن آن مقطع باشد (تصویر شماره ۱). برای تعیین ماهیت و محل انقطاع می‌توان از دامنه انعکاس دریافت شده و زمان رسید مربوط به آن برای مدل‌سازی زیرسطحی استفاده کرد.

در مقایسه با سایر تکنیک‌های غیرمخرب مانند ترموگرافی مادون قرمز، التراسونیک و یا میکروویو، ژئورادار قدرت نفوذ بیشتری را ارائه می‌دهد و بنابراین می‌تواند مدل‌سازی را در اعماق بیشتری انجام دهد. در این میان برای انجام مطالعات نزدیک به سطح (کمتر از ۲ متر) و رسیدن به دقت‌های بالا از آنتن‌هایی با فرکانس بالا (۸۰۰ مگاهرتز و بالاتر) استفاده می‌شود. همچنین برای مدل‌سازی اعماق بالاتر (چند متر تا چند ۱۰ متر) از آنتن‌هایی با فرکانس کمتر (مانند ۳۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰ و ۵۰ مگا هرتز) بهره برداری می‌شود.

رادار نفوذی به زمین یک روش وابسته به زمان واقعی است که در آن از امواج رادیویی فرکانس بالا به‌منظور داده‌برداری با سرعت و وضوح بسیار بالا استفاده می‌شود (نیل، ۲۰۰۴). در این روش از امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود که سرعت آن با توجه به ویژگی‌های مواد که از آن عبور می‌کند، تعیین می‌شود. تغییر در سرعت عبور امواج به دلیل تفاوت در خصوصیات الکتریکی مواد به اختلاف در زمان رفت و برگشت امواج منجر خواهد شد. چنانچه آنتن‌ها در امتداد خط برداشت حرکت می‌کنند، یک سری از ردهای زمانی (یک سری زمانی از داده‌های دریافتی) در نقاط خاصی از طول خط پروفیل، برداشت می‌کنند. سپس این

1. Hulsmeier

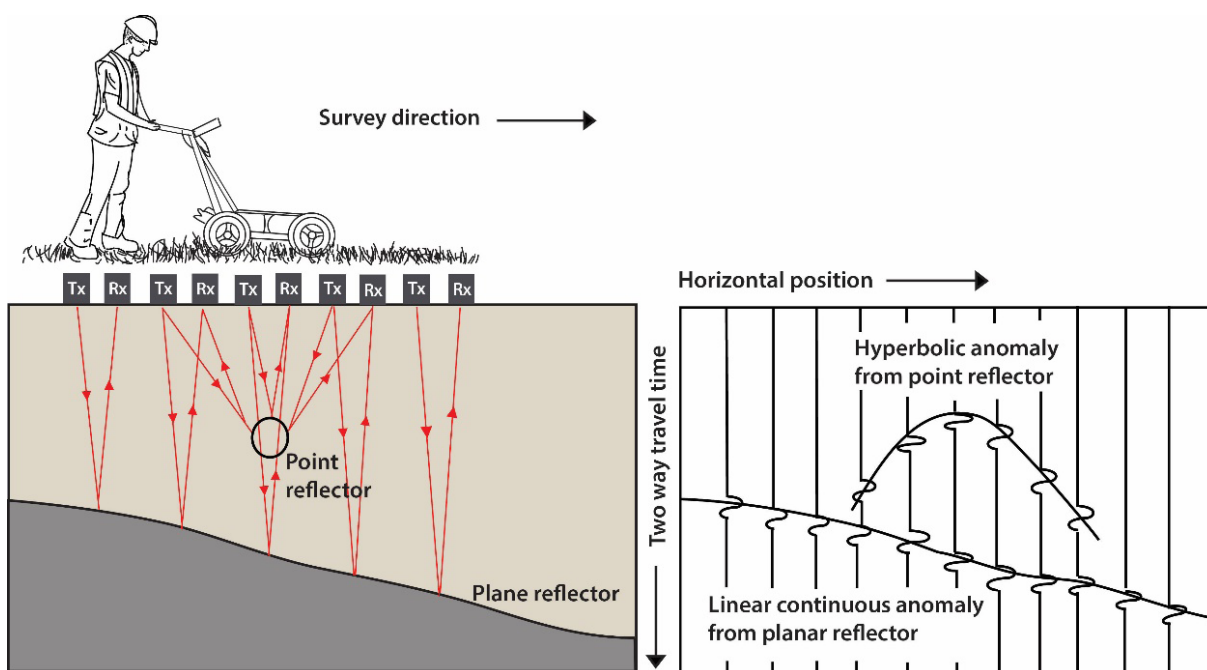


تصویر ۱. طرح شماتیک اصول کلی عملکرد ژئورادار در یک مقطع زمین ۳ لایه . چپ) پرتوهای منتقل و منعکس شده از مرز لایه‌ها؛ راست) تاریخچه زمانی سنجه سرعت متناسب با شکل سمت چپ.

معرفی محدوده مورد مطالعه و عملیات برداشت داده

در این مطالعه با استفاده از یک دستگاه ژئورادار مدل ۱۷۶۰ (ساخت شرکت ایمپالس رادار کشور سوئد) اقدام به داده‌برداری در بخش‌های تعیین‌شده در محدوده‌های مورد نظر گردید. این مدل دارای ۲ آنتن با فرکانس‌های ۱۷۰ و ۶۰۰ مگاهرتز می‌باشد. داده‌های برداشت‌شده با این ابزار، با قدرت تفکیک بالا امکان

سری‌های زمانی در کنار هم قرار گرفته تا نمای اسکن زیرسطحی را ایجاد کنند. تصویر شماره ۲ طرح شماتیکی از انتشار و ثبت امواج در روش ژئورادار است. داده‌های ثبت‌شده با فرمت‌های خاص ثبت می‌شوند. این اطلاعات پس از طی مراحل مختلف پردازشی به شکل مقاطع ژئوراداری در می‌آیند که برای شناسایی اهداف مختلف استفاده می‌شوند.



تصویر ۲. طرح شماتیک تولید و ثبت امواج رادار (چپ) و سیگنال‌های ثبت‌شده در یک راستای اندازه‌گیری (راست). xR و xT به ترتیب مخفف فرستنده و گیرنده امواج هستند.



تصویر ۳. نمایی از دستگاه ژئورادار مدل ۱۷۶۰.

سازند بود. از این رو به عنوان یکی از موارد مطالعاتی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین داده برداری در یک خیابان دارای علائم فرونشست و یک محدوده که دارای یک تونل کوچک قدیمی است، انجام شد. از نظر زمین شناسی این محدوده ها دارای رسوبات عهد حاضر می باشند. **تصویر شماره ۵** نمایی از محدوده مورد مطالعه و رخنمون حفرات و شکستگی ها در سطح را نشان می دهد. در محدوده های اشاره شده چندین برداشت در مسیرهای متفاوت انجام شد و نتایج پس از پردازش داده ها در هریک از این مناطق ارائه شده است. پس از پردازش داده ها، صرفاً نتایج آنومالی های شناسایی شده ارائه شده است.

پردازش و تفسیر داده ها

در این مطالعه داده برداری با دو آنتن دارای فرکانس مرکزی ۱۷۰ و ۶۰۰ مگاهرتز و با فاصله نمونه برداری افقی ۴ سانتی متر انجام رسید. به منظور پردازش داده ها از نرم افزارهای تخصصی Reflexw و CrossPoint استفاده شده است. از جمله مراحل پردازشی می توان به اعمال بهره تقویت دامنه^۲، فیلتر باند گذر^۳، تصحیح اشباع سیگنال^۴، تصحیح ایستاه^۵، تصحیح خط مبنا^۶ و حذف نوفه پس زمینه^۷ اشاره نمود. در ادامه مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مراحل مختلف پردازش داده ها در قالب **جدول شماره ۱** ارائه شده است.

2. AGC
3. Bandpass filter
4. Dewow filtering
5. Static Correction
6. Subtract-DC-shift
7. Background Removal

شناسایی لایه ها، حفرات و شکستگی های نزدیک به سطح (کمتر از ۱۲ متر) را در اختیار ما قرار می دهد (**گودمن و پیرو، ۲۰۱۳**). **تصویر شماره ۳** تصویر ژئورادار به کاربرده شده را نشان می دهد.

به منظور بررسی قابلیت روش ژئورادار در شناسایی حفرات و شکستگی های زیر سطحی سعی شد با توجه به اهمیت این موضوع در معابر و راه ها، داده برداری در این محدوده ها انجام شود. در این راستا، داده برداری در سه محدوده شامل راه در دست احداث (محدوده اول)، خیابان و جاده دارای روکش آسفالت (محدوده دوم) و نیز یک ناحیه بر روی یک تونل قدیمی زیر سطحی (محدوده سوم) انجام شد.

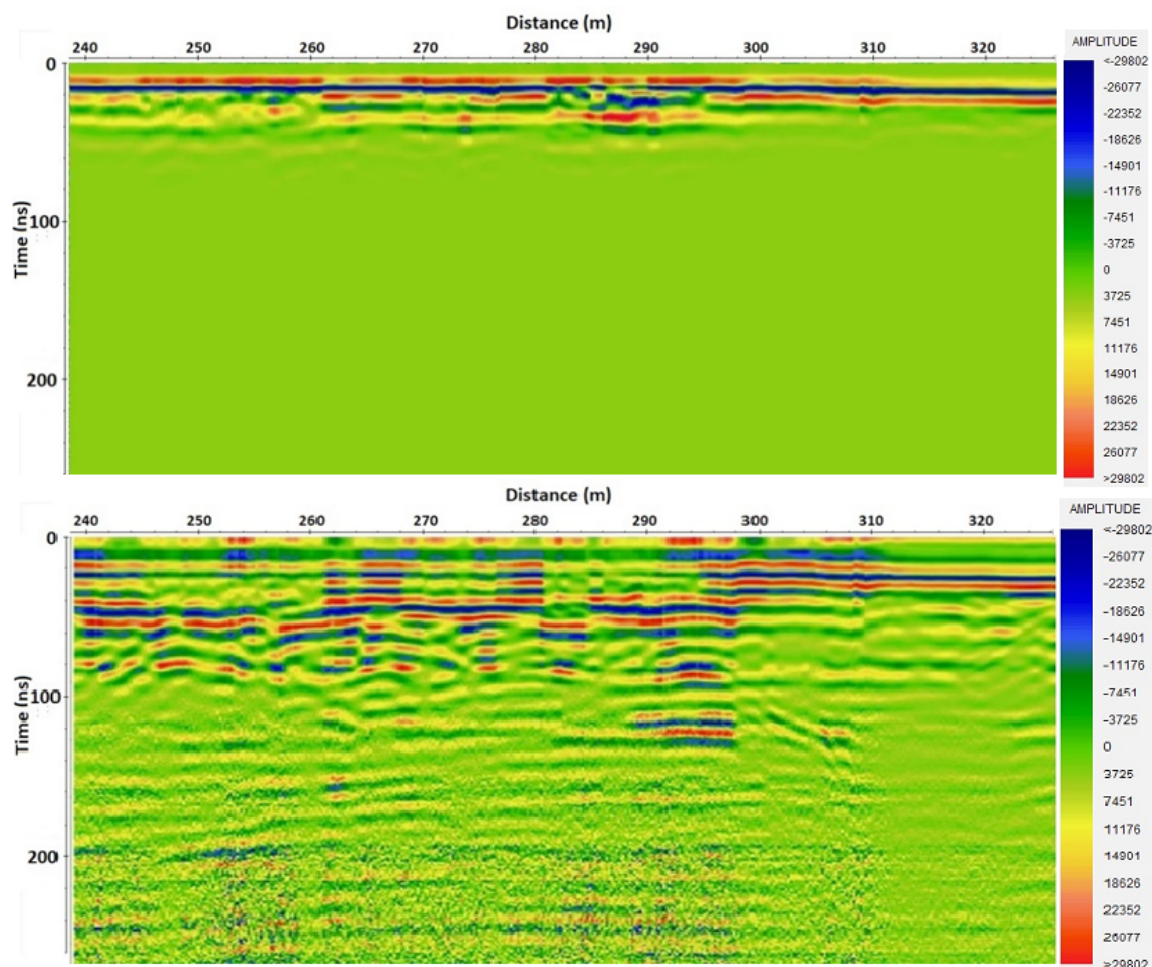
تصویر شماره ۴ تصویر ماهواره ای محدوده های انتخاب شده و نیز نمایی از پروفیل های برداشت شده در این محدوده ها را نشان می دهد. محدوده ها به گونه ای انتخاب شده اند تا وجود حفره و شکستگی در آن ها مشهود و یا معلوم باشد. محدوده های مورد مطالعه شامل دو محدوده در استان ایلام و یک محدوده در حاشیه شهر کرمانشاه و همگی در زون زمین شناسی زاگرس قرار دارند. ابتدا در یک جاده در دست احداث و در سازند گچساران داده برداری انجام شد. این سازند از بیش از ۵۰۰ متر، تناوب سنگ گچ و مارن قرمز تا آبی خاکستری و میان لایه های سنگ آهک مارنی کرم رنگ پدید آمده است. از جمله ویژگی های سازند گچساران با توجه به جنس مواد تشکیل دهنده آن که عمدتاً انیدرید و سنگ آهک می باشد، تأثیر پذیری زیاد آن از فرسایش به خصوص فرسایش ناشی از آب است. در واقع درصد انحلال مواد متشکل این سازند بسیار بالاتر از دیگر سنگ ها می باشد. بر این اساس می توان شاهد مناطق کارستی، حفرات، خردشدگی های مکرر، تورق و حالت اسفنجی در محدوده های نزدیک به سطح در این



تصویر ۴. تصویر ماهواره‌ای سه محدوده انتخاب‌شده با خطوط قرمز (تصویر بالا) و نیز نمایی از پروفیل‌های برداشت‌شده (خطوط آبی) در هر یک از این محدوده‌ها (پایین). محدوده اول سمت چپ، محدوده دوم وسط و محدوده سوم سمت راست.



تصویر ۵. نمایی از محدوده‌های مورد مطالعه. شکل‌های بالا برای جاده در دست احداث و پایین سمت راست خیابان دارای حفرهای سطحی و سمت چپ نیز محدوده دارای یک تونل کوچک قدیمی.



تصویر ۶: نمونه‌ای از داده‌ها قبل (بالا) و بعد از اعمال مراحل پردازش (پایین)

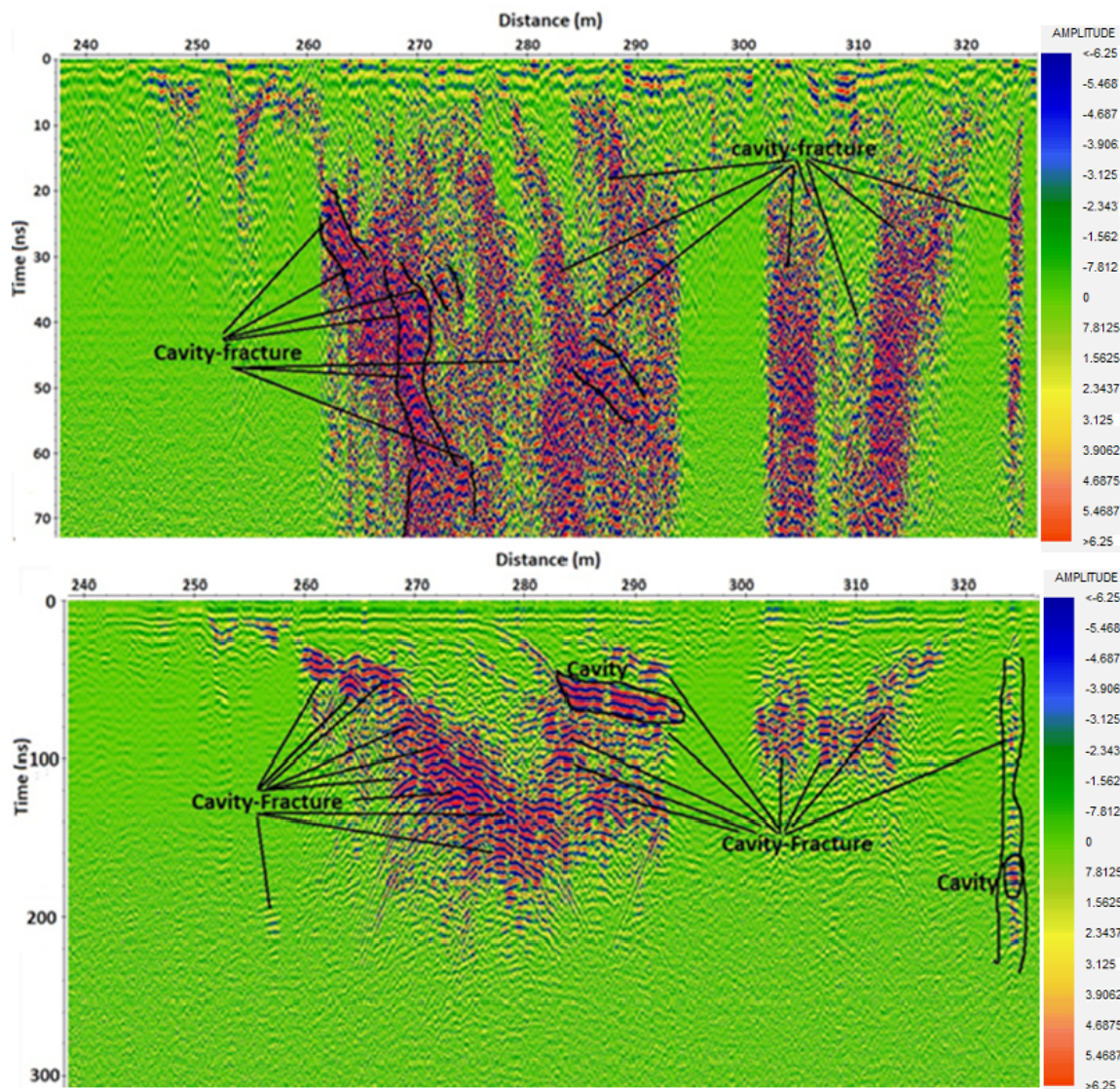
تصویر شماره ۶ یک نمونه از داده‌های به‌دست‌آمده قبل و بعد از پردازش را نشان می‌دهد.

در ادامه برای هریک از محدوده‌های اشاره‌شده، نتیجه به‌دست‌آمده ارائه شده است. پس از پردازش داده‌ها، با در نظر گرفتن ویژگی‌شناختی حفرات و شکستگی‌های زیرسطحی در داده‌های ژئورادار و نیز بررسی ضریب بازتاب و فاز امواج برگشتی از آنومالی‌های مشاهده‌شده در داده‌ها، تحلیل سرعت و نیز تحلیل طیف موجبری صورت گرفت و نتایج تفسیر شدند.

تصویر شماره ۷ نتیجه به‌دست‌آمده از داده‌های پردازش‌شده برای محدوده اول برای هر دو آنتن ۶۰۰ و ۱۷۰ مگاهرتزی را نشان می‌دهد. در این **شکل** محل وجود حفرات و شکستگی‌ها به تصویر درآمده است. نتایج نشان‌دهنده وجود حفرات بسیار با ابعاد متفاوت از مرتبه ۱ متر تا چند متر است که در امتداد شکستگی‌ها (ناحیه خردشده) و در ترکیب با آن‌ها قرار دارند. باتوجه به تعداد بالای حفرات کوچک در محدوده، در این **شکل** تنها حفرات و شکستگی‌های بزرگ مشخص شده‌اند. ناحیه دارای

این آنومالی نیز به‌خوبی و با وضوح بالا نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده برای آنتن ۶۰۰ مگاهرتزی جزئیات بیشتری از ناحیه نزدیک به سطح را نشان می‌دهد و تأییدکننده گسترش ناحیه مذکور تا سطح زمین است. این موضوع در **شکل** ارائه‌شده برای محدوده داده‌برداری کاملاً مشهود است.

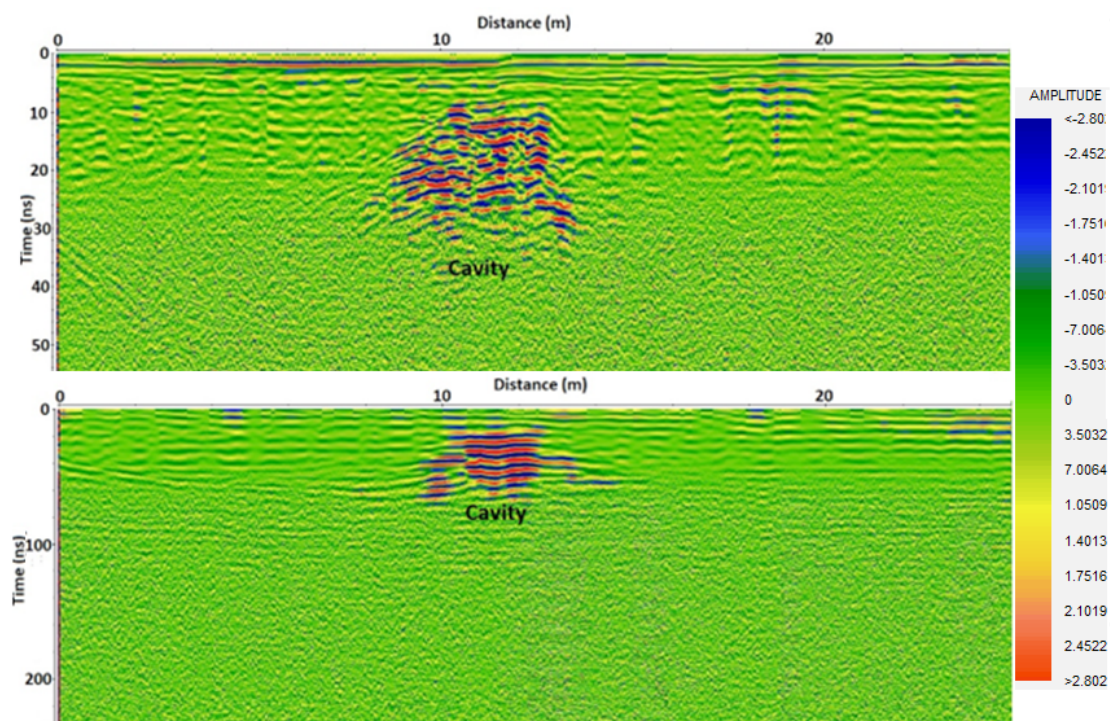
در **تصویر شماره ۸** نتایج به‌دست‌آمده برای محدوده دوم که در واقع یک خیابان با روکش آسفالت و دارای رخنمون حفره زیرسطحی است، نشان داده شده است. براساس نتایج مربوط به هر دو آنتن ۶۰۰ و ۱۷۰ مگاهرتزی، وجود یک حفره در محدوده مشهود است. این نتایج پس از انجام پردازش‌های ذکرشده و تحلیل‌های تفاسیر مربوطه ارائه شده‌اند. داده‌های این بخش در پروفیل‌های مختلف و موازی با فاصله عرضی ۱ متر از هم برداشت شده‌اند و بهترین پروفیل برای آشکارسازی حفره انتخاب و ارائه شده است. فضای خالی مشخص‌شده در این داده‌ها نزدیک به سطح بوده و با مشاهدات میدانی تطابق کامل دارد. ابعاد حفره از نظر طول در امتداد پروفیل حدود ۳ متر و از نظر ارتفاع حدود ۱ متر تخمین زده شده است.



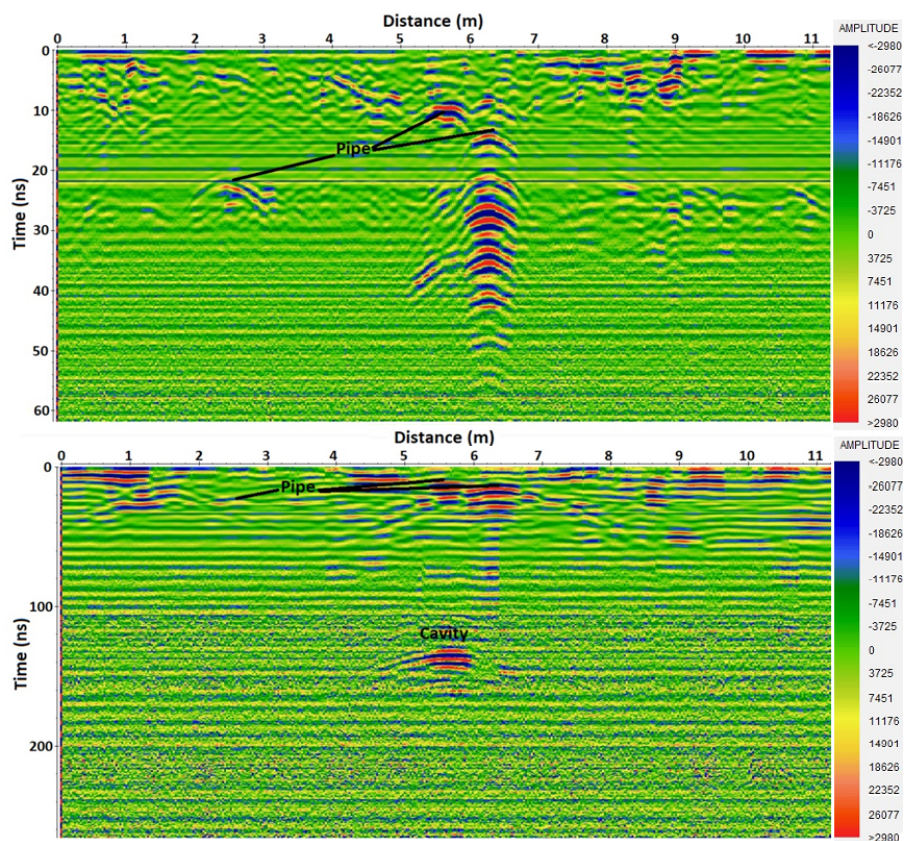
تصویر ۷. نتایج به دست آمده برای داده‌های پردازش شده از محدوده داده‌برداری اول برای دو آنتن ۶۰۰ (بالا) و ۱۷۰ مگاهرتز (پایین). تعدادی از حفرات و شکستگی مشخص شده است.

جدول ۱. مقادیر پارامترهای تعیین شده در انجام مراحل مختلف پردازش داده‌ها

عنوان پردازش	مقدار/نوع	واحد
بهره تقویت سیگنال	۵۵ تا ۳۰۰	نانو ثانیه
فیلتر باند گزر	۳۲ تا ۳۵۰، آنتن ۱۷۰ ۱۵۰ تا ۹۵۰، آنتن ۶۰۰	مگاهرتز
تصحیح اشباع سیگنال	۱۰ برای آنتن ۱۷۰ ۳ برای آنتن ۶۰۰	نانو ثانیه
تصحیح ایستا	اولین رسید	—
تصحیح خط مبنا	حذف میانگین	—
حذف نوفه پس زمینه	۱ تا ۲، آنتن ۱۷۰ ۲ تا ۶، آنتن ۶۰۰	متر



تصویر ۸. نتایج به دست آمده برای داده‌های پردازش شده از محدوده داده برداری دوم (خیابان) برای دو آنتن ۶۰۰ (بالا) و ۱۷۰ مگاهرتز (پایین). محل وجود حفره به خوبی نمایان شده است.



تصویر ۹. نتایج به دست آمده برای داده‌های پردازش شده از محدوده داده برداری سوم (تونل کوچک قدیمی) برای دو آنتن ۶۰۰ (بالا) و ۱۷۰ مگاهرتز (پایین). محل وجود حفره در نتایج به خوبی نمایان شده است.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

تمامی اصول اخلاق پژوهش در این مقاله رعایت شده است.

حامی مالی

بخشی از جمع‌آوری داده‌ها در این مطالعه با حمایت مالی اداره کل راه و شهرسازی استان ایلام انجام شده است.

مشارکت نویسندگان

همه نویسندگان به‌طور یکسان در مفهوم و طراحی مطالعه، جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل داده‌ها، تفسیر نتایج و تهیه پیش‌نویس مقاله مشارکت داشتند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان از سازمان مدیریت و کاهش بلایای تهران (TDMMO) و دانشگاه رازی به خاطر کمکشان در ارائه اسناد تحقیقاتی و جنبه‌های روش‌شناختی کار تشکر می‌کنند.

برای محدوده سوم که در آن یک تونل کوچک قدیمی مدفون قرار دارد، نتایج در **تصویر شماره ۹** برای هر دو آنتن ۶۰۰ و ۱۷۰ مگاهرتز به نمایش گذاشته شده است. در این برداشت نیز پس از یافتن محدوده احتمالی و مسیر عبور تونل، تعداد ۱۵ پروفیل در راستای عمود بر مسیر احتمالی آن برداشت شد که فاصله عرضی آن‌ها نسبت به هم ۳ متر می‌باشد. در اکثر نتایج حاصل‌شده برای این پروفیل‌ها، محل وجود تونل به‌خوبی نمایان است. البته در دو مورد از این پروفیل‌ها، آنومالی مربوطه به تونل ضعیف بوده که می‌تواند حاکی از پرشدگی موضعی تونل باشد. باتوجه به عمق نسبتاً زیاد تونل (بین ۶ تا ۷ متر)، وجود آن در آنتن ۱۷۰ مگاهرتز نمایان است. در این ناحیه تأسیسات زیرسطحی شامل چند لوله نیز وجود داشته که تصویر آن‌ها در نتایج مرتبط با آنتن ۶۰۰ مگاهرتز به‌خوبی مشخص شده است. باتوجه به عبور پروفیل در راستای تقریباً عمود بر مسیر شناسایی‌شده برای تونل، ابعاد تقریبی تخمین زده‌شده برای حفره تونل عرض حدود ۸۰ سانتی‌متر و ارتفاع حدود ۱ متر است.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از روش ژئورادار با دو آنتن دارای فرکانس مرکزی ۱۷۰ و ۶۰۰ مگاهرتز به مطالعات زیرسطحی سه محدوده که دارای شواهد وجود حفرات و شکستگی‌ها بودند، پرداخته شد. محدوده اول در سازند گچساران و مرتبط با بخشی از یک جاده در دست احداث در استان ایلام است که با مشکلات فرونشست و ایجاد حفرات در سطح مواجه می‌باشد. برداشت در محدوده دوم نیز در یک خیابان واقع در شهر ایلام انجام شد که به‌وضوح دارای رخنمون حفره در سطح بود. محدوده سوم در کرمانشاه و ناحیه دارای یک تونل قدیمی کوچک که در چند دهه گذشته مدفون شده بود، انتخاب شد. وجود حفرات و شکستگی‌ها با شواهد و آثار سطحی مورد تأیید و مشهود می‌باشد.

در این پژوهش از هر دو آنتن برای برداشت داده‌ها در بهترین عمق نفوذ آن‌ها، برای نزدیک به سطح، آنتن ۶۰۰ مگاهرتز (کمتر از ۳ متر) و عمق بیشتر، آنتن ۱۷۰ مگاهرتز (کمتر از حدود ۱۴ متر) استفاده شد. پس از عملیات برداشت، داده‌ها با روش‌های استاندارد پردازش توسط دو نرم‌افزار Reflexw و CrossPoint مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده از هر سه محدوده پس از پردازش و بررسی‌های تحلیلی، به‌خوبی وجود حفرات و شکستگی‌ها در عمق‌ها و ابعاد مختلف را تأیید و آشکارسازی نمود. هر سه محدوده از نظر ابعاد، عمق قرارگیری و شرایط زمین‌شناسی حفرات دارای شرایط متفاوت از هم بوده تا کارایی روش مورد استفاده با به‌کارگیری آنتن‌های ۶۰۰ و ۱۷۰ مگاهرتز مورد ارزیابی قرار گیرد. در مجموع، نتایج حاصل‌شده قابلیت بالای این روش را برای شناسایی حفرات، شکستگی‌ها و به تبع آن‌ها وجود مکان‌های مستعد فروریزش و مانند آن را نشان می‌دهد.



References

- Ahmadi, R., Fathianpour, N., & Norouzi, G. (2014). [Improving Ground Penetrating Radar (GPR) forward modeling approach using the numerical finite difference method (Persian)]. *Iranian Journal of Geophysics*, 8(3), e33558. [\[Link\]](#)
- Annán, A. P. (2009). Electromagnetic principles of ground penetrating radar. In H. M. Jol (Ed.), *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications* (pp. 1-40). Amsterdam: Elsevier. [\[DOI:10.1016/B978-0-444-53348-7.00001-6\]](#)
- Benedetto, A., Tosti, F., Ciampoli, L. B., & D'amico, F. (2017). An overview of ground-penetrating radar signal processing techniques for road inspections. *Signal Processing*, 132, 201-209. [\[DOI:10.1016/j.sigpro.2016.05.016\]](#)
- Daniels, D. J. (2004). *Ground Penetrating Radar*. London: The Institution of Electrical. [\[DOI:10.1049/PBRA015E\]](#)
- Hosaini, M., Kamkar Rouhani, A., Mohammadivizheh, M., & Parnow, S. (2017). [A comparison between the results of ground penetrating radar and magnetic surveys in near surface investigations: A case study (Persian)]. *Iranian Journal of Geophysics*, 11(2), 76-86. [\[Link\]](#)
- Goodman, D., & Piro, S. (2013). *GPR remote sensing in archaeology*. New York: Springer. [\[DOI:10.1007/978-3-642-31857-3\]](#)
- Neal, A. (2004). Ground penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth Science Reviews*, 66, 261-330. [\[DOI:10.1016/j.earscirev.2004.01.004\]](#)
- Parasnis, D. S. (1997). *Principles of applied geophysics*. London: Chapman and Hall. [\[Link\]](#)
- Slob, E., Sato, M., & Olhoeft, G. (2010). Surface and borehole ground-penetrating-radar developments. *Geophysics*, 75(5), 75A103-75A120. [\[DOI:10.1190/1.3480619\]](#)

This Page Intentionally Left Blank