Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Identify and explore the subsurface gypsum karst formations of the Masjed Soleyman Petrochemical site using geophysical and geotechnical methods

Mohammad Hossein Jowkar[1], Mashallah khamehchiyan[2]✉, Mohammad Reza Nikudel[3], Asghar Azadi[4]

1. MSc student, Faculty of Engineering geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, E-mail: h.jowkar@modares.ac.ir
2. Professor, Faculty of Engineering geology Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: khamechm@modares.ac.ir
3. Associate professor, Faculty of Engineering geology Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: nikudelm@modares.ac.
4. CEO and Director of the Geophysics Group of Zamin Physic Pooya Company, Tehran, Iran, E-mail: info@zaminphp.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 21 August 2025
Accepted 8 November 2024

Keywords:
Gypsum karst, GPR, Masjed Soleyman Petrochemical, groundwater, Corona satellite.

ABSTRACT

Over the past three decades, research into the factors influencing the development of gypsum karsts has become an active and growing area of study. The mechanically weak nature of gypsum, along with its rapid dissolution and deformability, contributes to the formation of gypsum karsts, voids, and caverns in regions where gypsum deposits are present. This process can significantly undermine geotechnical stability by reducing bearing capacity and increasing settlement. This issue is particularly critical in heavy industrial settings such as petrochemical facilities, where large storage tanks and other infrastructure are founded directly on the ground surface. Consequently, identifying and assessing these processes is essential for the design, construction, and maintenance of engineering projects. This study assesses subsurface gypsum karsts within the Masjed Soleyman Petrochemical site using an integrated geophysical and geotechnical approach. Ground Penetrating Radar (GPR) was employed across 24 profiles totaling 2,307 meters, also geotechnical data were obtained from 113 boreholes drilled to depths of 20–40 meters. Following data analysis, 32 occurrences of subsurface gypsum karsts were identified at depths ranging from 4 to 36 meters. Subsequently, surface water drainage patterns were analyzed and digitized from historical Corona satellite imagery (1968). In parallel, groundwater levels and flow direction maps were generated using data from electric probe depth finder measurements in boreholes. The integration of these datasets revealed that most gypsum karsts are concentrated in areas where groundwater tends to accumulate and flow. Finally, groundwater sampling and chemical analysis revealed an average sulfate concentration of approximately 1,480 ppm, indicative of a severe sulfate exposure environment.

Introduction

The formation of karst features in gypsum follows patterns similar to those in limestone and dolomite; however, the rate and extent of dissolution and karst development are considerably greater in gypsum than in carbonate rocks (Gutierrez et al., 2008a; Al-Saoudi et al., 2013). Unlike carbonate karsts, gypsum karsts can develop within a human lifetime rather than over millions of years (Gutierrez et al., 2008b; 2008c). This process can significantly undermine geotechnical stability by reducing bearing capacity and increasing settlement. The issue is particularly critical in heavy industrial settings such as petrochemical facilities, where large storage tanks and other infrastructure are founded directly on the ground surface. Therefore, identifying and assessing these processes is essential for the safe design, construction, and maintenance of engineering structures.

Cite this article: Jowkar, M. H., khamehchiyan, M., Nikudel, M. R., Azadi, A. (2025). Identify and explore the subsurface gypsum karst formations of the Masjed Soleyman Petrochemical site using geophysical and geotechnical methods. Journal of Engineering Geology, 19 (3), 378-413. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1018981

© The Author(s).
Publisher: Kharazmi University.
DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1018981

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]

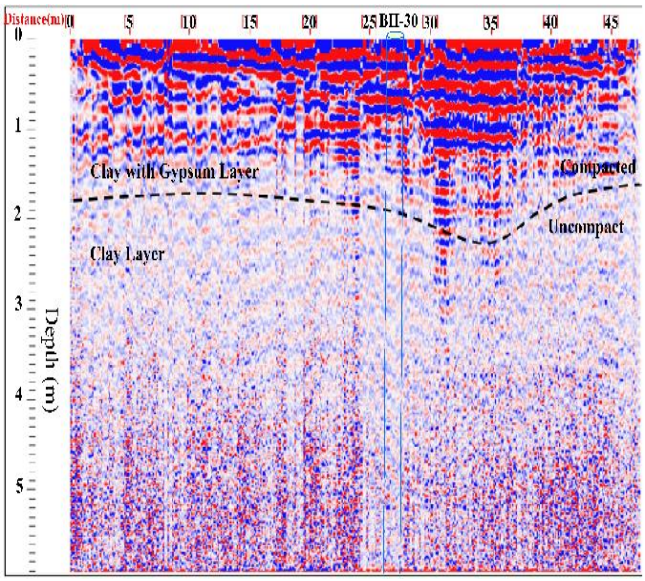
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

Materials and Methods

In this study, the gypsum layers of the Gachsaran Formation were initially surveyed for karst features and subsurface anomalies using 24 geophysical profiles totaling 2,307 meters in length, employing a 50 and 250 MHz antenna, and ReflexW software. These results were then integrated with borehole data where karst features had been identified in order to produce a digital map of gypsum karsts in the study area. The digital map was then combined with Corona satellite imagery (1968), Google Earth imagery (2011), and groundwater flow maps derived from borehole water-level measurements obtained using an electric depth probe. The aim of this integration was to evaluate the influence of surface water and groundwater on the formation and evolution of subsurface gypsum karsts. Furthermore, the validity and accuracy of the digital gypsum karst map were evaluated using SPT zoning maps above the groundwater level (4.5 m), at the water table (10.5 m), and below it (15 m), along with lithological zoning maps of subsurface materials at the same depths and the underlying bedrock map. In the final stage, recognizing the significant influence of groundwater on gypsum karst formation, hydrochemical parameters including pH, hardness, major cations (Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}), and anions (Cl^{-}, SO_4^{2-}, NH_3)— were analyzed in groundwater samples collected from five boreholes through 40 laboratory tests. The results were then evaluated in accordance with the European Standard for Concrete Strength in Specific Environments (STN EN 206-1, 2002) and the Iranian Building Regulations (ABA; Ministry of Roads and Urban Development of Iran, 2013, 2019) to propose mitigation measures for the risks associated with gypsum karsts.

Results and Discussion

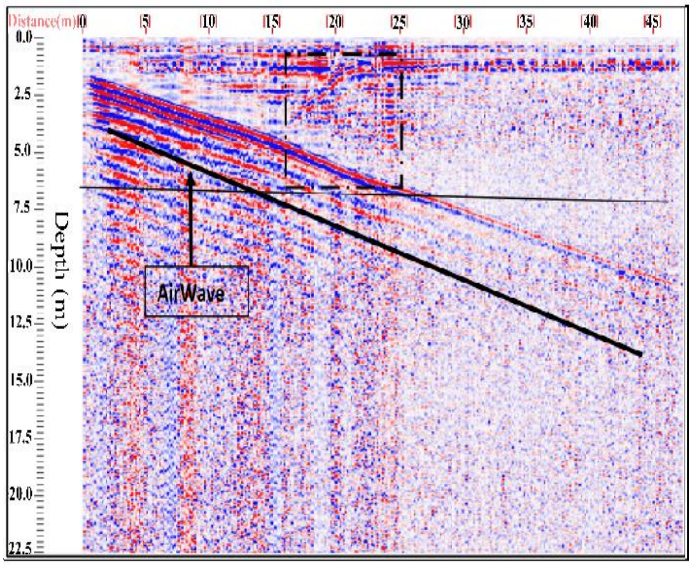
Geophysical surveys using GPR in the study area revealed the presence of cavities, fractures, and variations in subsurface layering. For example, Profile 1 (47.5 m long), acquired in the eastern part of the site, was correlated with geotechnical data from borehole BH-30, located along approximately 27 meters in the GPR survey line (Figure 1). The correlation indicates that, to a depth of approximately 2 to 4 meters, the subsurface consists of a dense gypsum–clay layer (as supported by SPT values), underlain by a less dense clay layer. Additionally, the long-dip reflection anomaly can be attributed to airwave effects and does not represent a geological feature In conclusion, GPR depth profiles not only enable identification of the lithology, texture, and depth of the Gachsaran Formation sediments but also facilitate the detection of subsurface gypsum karsts. A 50 MHz frequency can penetrate to depths of up to 10 meters in the study area, making it suitable for geological surveys and for identifying dissolution cavities at that depth, particularly given the groundwater constraints of the petrochemical site. However, the longer wavelength of this frequency results in lower vertical and horizontal resolution in radar images. The 250 MHz frequency can penetrate to approximately 5 meters, making it ideal for geological surveys requiring higher-resolution imaging. Due to its shorter wavelength, it offers higher resolution and an enhanced ability to detect smaller subsurface features, though at the cost of reduced depth penetration. It is recommended that the GPR frequency be selected according to the specific research objectives and the characteristics of the subsurface environment. In this study, GPR data acquired at frequencies of 50 and 250 MHz to a depth of 10 meters were analyzed to examine the effects of subsurface voids, which manifest geophysically as signal attenuation and appear as hyperbolic anomalies in the profiles. Nevertheless, a comprehensive understanding of the complex electromagnetic properties of gypsum and the mechanisms by which gypsum and sulfate influence GPR depth penetration requires further detailed investigation.



GPR Profiles - Antenna 250 MHz



Geotechnical Evidence's



GPR Profiles _ Antenna 50 MHz

Fig 1. Trace (GPR Mapping) interpretation using 50 and 250 Hz GPR sections, supported by geotechnical data from BH-30.

Furthermore, by integrating the identified gypsum karsts at various depths with surface water maps—generated from digitized Corona satellite imagery and Google Earth data—and with groundwater flow direction maps derived from borehole water-level measurements using an electric depth probe, the analysis revealed that the gypsum karsts and cavities in the study area occur at depths ranging from 4 to 36 meters below the Earth's surface, with an average depth of approximately 16 meters. Of the 32 identified karst cavities, 23 are located at an average depth of 19.6 meters below the groundwater table, while nine occur at an average depth of 6.5 meters above it. The predominance of more than 23 karst cavities below the groundwater table (Figure 2-a) and their occurrence in zones of groundwater accumulation and flow (Figure 2-b) indicate that groundwater dynamics constitute the main controlling factor in gypsum karst development. Considering the average sulfate concentration in groundwater (1480 ppm), and according to the National Building Regulations of Iran—specifically Section 9 (ABA)—the sulfate level corresponds to moderate (XS1) to

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

severe (XS2) environmental exposure classes with respect to sulfate attack.

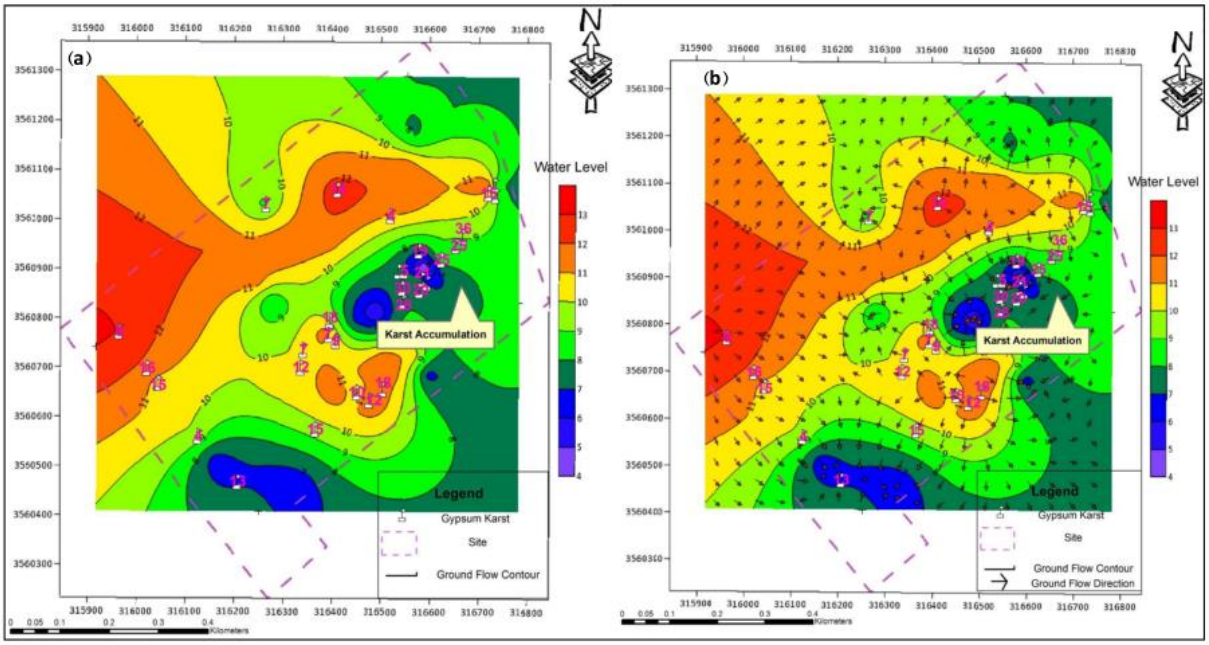


Fig 2. a) Illustrates the connection between gypsum karst and groundwater levels, b) location of the gypsum karsts accumulation within the direction of groundwater flow

Conclusions

The integration of GPR and geotechnical methods has revealed that the identified gypsum karsts are generally aligned with the central part of the Masjed Soleyman Petrochemical site. GPR results indicate that the effective investigation depths for gypsum karsts are approximately 5 and 10 meters, corresponding to the 250 and 50 MHz frequencies, respectively. Finally, it can be concluded that shallow karsts and cavities likely result from the dissolution of gypsum-rich soils, whereas deeper karsts and cavities within fractured gypsum rock are primarily attributed to groundwater flow.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

شناسایی و بررسی کارست‌های زیرسطحی گچی در محدوده مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان به روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی

محمدحسین جوکار[۱]، ماشاالله خامه چیان[۲]✉، محمدرضا نیکودل[۳]، اصغر آزادی[۴]

۱. کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، h.jowkar@modares.ac.ir
۲. استاد، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس،تهران، ایران، khamechm@modares.ac.ir
۳. دانشیار، گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس،تهران، ایران،nikudelm@modares.ac.ir
۴. مدیرعامل و مدیر گروه ژئوفیزیک شرکت زمین فیزیک پویا، تهران، ایران، info@zaminphp.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلیدواژه‌ها:
کارست گچی، GPR، پتروشیمی مسجدسلیمان، آب زیرزمینی، ماهواره کرونا.

چکیده

شناسایی و بررسی عوامل مؤثر بر تشکیل کارست‌های گچی یکی از موضوعات جدید و جذاب در سه دهه اخیر است. مقاومت پایین گچ به همراه فرایند انحلال و شکل‌پذیری آن در مقیاس زمان انسانی باعث تشکیل کارست‌های گچی، حفرات و غارها در سازندهایی که شامل لایه‌های گچی هستند، می‌گردد که این پدیده می‌تواند تأثیر بسیار مخربی بر ویژگی‌های مهندسی زمین همچون ظرفیت باربری، نشست پذیری و غیره به‌خصوص در سایت‌های دارای صنایع سنگین همچون پتروشیمی‌ها به دلیل قرارگیری مخازن بزرگ و تأسیسات آن‌ها بر سطح زمین داشته باشد. بنابراین شناسایی و مطالعه آن‌ها برای احداث و نگهداری سازه‌های مختلف مهندسی بسیار حائز اهمیت است. بر این اساس در این پژوهش کارست‌های گچی زیرسطحی مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان با استفاده از تلفیق روش ژئوفیزیکی غیر مخرب (GPR) در ۲۴ پروفیل به طول کل ۲۳۰۷ متر (مجموع دو آنتن) و روش ژئوتکنیکی (حفر ۱۱۳ گمانه در اعماق ۴۰-۲۰ متر) مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از تحلیل و بررسی داده‌ها، تعداد ۳۲ مورد کارست گچی زیرسطحی در اعماق ۳۶-۴ متری مورد شناسایی قرار گرفت. در ادامه با بررسی و پردازش تصویر ماهواره‌ای کرونا مربوط به نیم‌قرن پیش الگوی مجاری آب سطحی و با اندازه‌گیری عمق آب در گمانه‌ها، نقشه‌های سطح و جهت جریان آب زیرزمینی منطقه ترسیم و مشخص گردید عمده حضور کارست‌های گچی در محل تجمع جریان آب زیرزمینی می‌باشد. درنهایت با نمونه‌برداری از آب زیرزمینی و انجام آزمایش‌های شیمی آب میانگین مقدار سولفات آب زیرزمینی 1480 ppm به دست آمد که این شرایط محیطی ازنظر هجوم سولفات شدید می‌باشد.

مقدمه

وسعت اراضی که در آن سنگ‌های سولفاته در سطح یا عمق زمین رخنمون دارند زیاد است به‌طوری‌که تخمین زده می‌شود رسوبات تبخیری، ژیپس و انیدریت ۲۵-۸ درصد سطح قاره‌های زمین (یعنی تقریباً ۶۰ میلیون کیلومترمربع) را به خود اختصاص داده‌اند که در این حجم قابل‌توجه، فرایندهای کارستی به‌طور گسترده توسعه‌یافته‌اند (Ford & Klimchouk et al., 1996; and Williams, 2007 ; Maximovitch, 1962). به‌نحوی‌که یکی از بزرگ‌ترین مناطق سنگ‌های سولفاتی در نیمکره شمالی، به‌ویژه در ایالات‌متحده آمریکا (۳۵ تا ۴۰٪ از مساحت کشور) و در روسیه (با وسعت ۵ میلیون کیلومترمربع) می‌باشد. در ایران نیز، در جنوب غربی آن، نزدیک به مرز عراق، در میان رشته‌کوه‌های زاگرس نهشته‌های دریایی سازند گچساران

استناد: جوکار، م. ح.، خامه چیان، م.، نیکودل، م. ر.، آزادی، ا. (۱۴۰۴). شناسایی و بررسی کارست‌های زیرسطحی گچی در محدوده مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان به روش‌های ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۳)، ۳۷۸-۴۱۳. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1018981

ناشر: دانشگاه خوارزمی. © نویسندگان.
CC BY NC

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

به‌عنوان اولین سازند گروه فارس به شمار می‌آید که سنگ‌شناسی کلی آن در فروافتادگی دزفول مشتمل بر حدود ۱/۶ کیلومتر نمک، انیدریت، مارن‌های رنگارنگ، سنگ‌آهک و یک‌لایه شیل بیتومین‌دار است و در سطح زمین به‌جای انیدریت بیشتر ژیپس دیده می‌شود و نمک نیز به‌ندرت در سطح زمین یافت می‌شود (Amiri Bakhtiar and Klimchouk et al., 1996; Noorani Nejad, 2014).

واژه کارست به مجموعه‌ای از فرایندهای زمین‌شناسی و پدیده‌های حاصل از آن‌ها در پوسته و سطح زمین گفته می‌شود که عمدتاً شامل پدیده‌های ناشی از انحلال سنگ‌ها می‌باشد و با تشکیل بازشدگی‌ها، تخریب و تجزیه‌ی ساختمان سنگ‌ها و ایجاد نوع ویژه‌ای از رژیم گردش آب، نوع خاص توپوگرافی منطقه و بالاخره تشکیل رژیم خاصی از زهکشی آشکار می‌گردد (Milanovic, 1981). فرآیندهای توسعه ویژگی‌های کارستی در گچ با آن‌هایی که در سنگ‌آهک و دولومیت، شکل می‌گیرند یکسان است با این تفاوت که فرآیندها بسیار سریع‌تر هستند. حلالیت $CaSO_4.2H_2O$ از حدود ppm ۲۶۰۰ تا ۲۲۰۰ در محدوده دمایی ۴۰-۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است (Johnson, 1996). درواقع به دلیل حلالیت بالا gr/lit ۲/۵۳۱ در ۲۰ درجه سانتی‌گراد آب مقطر (Klimchouk, 1996) و سرعت انحلال سریع، کارست در گچ می‌تواند در یک مقیاس زمانی سریع توسعه و تکامل یابند چنانچه اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی و میدانی نشان می‌دهد که آب شیرین با سرعت ۱ متر در ثانیه می‌تواند ۱/۸- ۱/۷ متر گچ را در یک سال حل کند (James, 1992; Dreybrodt, 2004). درجاهایی که آب‌شور وجود دارد، حلالیت گچ ممکن است تا ۴ برابر افزایش یابد. بنابراین در این شرایط یا جایی که جریان متلاطم آب شیرین وارد کارست‌های گچی زیرزمینی می‌شود، سرعت حذف گچ بسیار افزایش می‌یابد (Cooper and Gutiérrez, 2013). همچنین درجایی که گچ با سنگ‌های کربناته مجاور در تماس است وجود سولفات در آب سرعت انحلال دولومیت را افزایش می‌دهد به‌نحوی‌که برای آب با محتوای ۱ میلی‌گرم در لیتر سرعت انحلال دولومیت ۱/۶۷ میلی‌گرم در لیتر بود درحالی‌که سرعت انحلال سنگ‌آهک ۰/۹۴ میلی‌گرم در لیتر می‌باشد. بعلاوه، وجود یون‌های سدیم، منیزیم و کلرید (احتمالاً از دولومیت‌ها و بسترهای هالیت به‌دست‌آمده) می‌تواند به انحلال گچ سرعت ببخشد (James, 1992). درمجموع این قابلیت بالای انحلال نشان می‌دهد که شدت و میزان توسعه انحلال و کارست در ژیپس بیش از سنگ‌های کربناته است (Gutierrez et al., 2008a; Al-Saoudi et al., 2013). بر اساس فرایند انحلال‌پذیری و آبشویی گچ و ژیپس، عوارض کارستی که عموماً کارست گچی نامیده می‌شود در مناطق مستعد به وجود می‌آیند (Ford and Williams, 2007). گچ‌ها مقاومت مکانیکی پایین‌تر و شکل‌پذیری بسیار بیشتری نسبت به سنگ‌های آهکی دارند. علاوه بر آن به دلیل حلالیت و سرعت انحلالی بالای گچ، توسعه عوارض کارستی در آن بسیار سریع‌تر از سنگ‌آهک رخ می‌دهد، بنابراین کارست‌های گچی می‌توانند به‌جای مقیاس زمان زمین‌شناسی، در مقیاس زمانی انسانی تکامل یابند (Gutierrez et al., 2008c ; Gutierrez et al., 2008b). هیدروژئولوژی آبخوان‌های دارای کارست گچی عمدتاً تابع لایه‌بندی، محل تغذیه و خروج آب (شرایط مرزی) و تخلخل ثانویه که در زمان متغیر می‌باشند است و شروط اساسی برای توسعه کارست گچی عبارت‌اند از : ۱- حضور ژیپس و انیدریت؛ ۲-حضور آب، در شرایط غیراشباع با $CaS04$، ۳- خروج آب در حال حل شدن و ۴- انرژی برای عبور آب (Johnson, 1996; Klimchouk, 1996). خرابی‌های زیرسطحی ناشی از انحلال گچ نیز عبارت‌اند از: ریزش حفرات منفرد، جابه‌جایی حفرات و حفره‌زایی تدریجی (Solis and Zhang, 2008). از مشخصه‌های چشم‌اندازهای کارستی کربناتی و تبخیری

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

می‌توان فروچاله‌ها یا دولین‌ها (Dolins) را نام برد. آن‌ها می‌توانند طیف وسیعی از ویژگی‌های هندسی را به نمایش بگذارند و ممکن است قطر و عمق آن‌ها به صدها متر برسد (Williams, 2004). فروچاله‌ها و حفرات راه ورود آب به آبخوان‌های کارستی می‌باشند و به دو گروه فروچاله‌های انحلالی و فرونشستی طبقه‌بندی می‌گردند. گروه اول توسط کاهش یافتن تدریجی و افتراقی سطح زمین، مناطقی سنگ‌های کارستی بدون پوشش در سطح هستند یا صرفاً با خاک پوشیده شده‌اند، ایجاد می‌شود و توسعه آن‌ها توسط جریان متمرکز به سمت مناطق با نفوذپذیری بالاتر (مجاری انحلالی) اتفاق می‌افتد. گروه دوم شامل انواع مختلفی از فروچاله‌ها می‌باشد که نتیجه انحلال سطحی و حرکت گرانشی رو به پایین مواد پوشاننده رخ می‌دهد (Safari et al., 2018; Gutierrez and Cooper, 2013). حال‌آنکه، حضور کارست‌های گچی می‌تواند برای بسیاری از پروژه‌های مهندسی و ژئوتکنیکی همچون جاده‌سازی، پل‌سازی، ساختمان‌سازی، معادن، شبکه‌های زهکشی و کانال‌های انتقال آب، سدها و توسعه‌های شهری ایجاد محدودیت کرده و یا حتی آن‌ها را متوقف کند. بسیاری از شهرها و شهرک‌ها در جهان به‌طور جزئی یا کامل با گچ پوشانده شده‌اند، ازجمله پاریس (فرانسه)، دزرژینسک (Dzerzhinksk) (روسیه)، ساراگوسا (Zaragoza) ، کالاتایود (Calatayud) و حومه مادرید (اسپانیا)، شهرهای بیرزایی (Birzai) و پاسوالیاس (Pasvalys) (لیتوانی)، ریپون (Ripon) و دارلینگتون (Darlington) (بریتانیا). در همه این مکان‌ها و بسیاری موارد دیگر، سنگ‌بستر محلول و ناپایدار یک خطر زمین‌شناسی است که برای برنامه‌ریزی و ساخت‌وساز مشکل ایجاد می‌کند (Cooper and Gutiérrez, 2013). به‌نحوی‌که در شهر سارگوسا اسپانیا زندگی حدود ۷۰۰۰۰۰ نفر به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مناطق شهری، تحت تأثیر گچ و سایر انحلال‌های تبخیری قرارگرفته است (Gutiérrez et al., 2007; Gutierrez et al., 2008C; Galve et al., 2009) و در منطقه دزرژینسک روسیه گچ کارستی شده و منجر به مشکلات شدید فرونشست شده و زندگی بیش از ۲۵۰۰۰۰ نفر و یک مرکز صنعتی بزرگ را تحت تأثیر قرار داده است (Reuter and Tolmačëv, 1990; Tolmachev et al., 2003; Koutepov et al., 2008). شهر موصل در عراق به دلیل افزایش مصرف آب و زهکشی آب به داخل کارست‌های گچی دچار فرونشست سریع شده است (Jassim et al., 1997; Kifae, 2010). همچنین گزارش‌شده سدهای متعددی در آمریکا همچون سدهای سان فرناندو (San Fernando) ، درای کانیون (Dry Canyon) ، بوئنا ویستا (Buena Vista) ، الیو هیلز (Olive Hills) و کاستائیک (Castaic) در کالیفرنیا، سدهای هوندو (Hondo)، مک میلان (MacMillan) و آوالون (Avalon) در نیومکزیکو، سد سندفورد (Sandford) در تگزاس، سد صخره سرخ (Red Rock) در آیووا، سد فونتانل (Fontanelle) در اوکلاهاما، سدهای هورس توث (Horsetooth) و کارتر (Carter) در کلرودو و سد موزس ساندرز توور (Moses Saunders Tower) در نیویورک در طول ساخت‌وساز یا پس از بهره‌برداری دارای مشکلات کارست‌های گچی بوده و یا با آن مواجه شده‌اند (Brune, 1965; James, 1992; Johnson, 2008). چنانچه بدترین فاجعه در این زمینه، ریزش سد سنت فرانسیس ایالت کالیفرنیا به علت انحلال رگه‌های گچی در زیر پی سد، که بیش از ۴۰۰ نفر کشته شدند و خسارت میلیون‌ها دلار را به همراه داشت (Ransome, 1928; James, 1992; Yilmaz, 2001).

در ایران نیز می‌توان به ایجاد ترک‌های شدید و فرار آب از مخزن زیرزمینی آب آشامیدنی جزیره هنگام در خلیج‌فارس (Rahimi and Yoosefi, 1995). نشت زیاد آب در سد مخزنی قیصراغ تبریز (Fakhri et al., 2008) تخریب

کانال‌های آبیاری و انتقال آب نکوآباد و کانال مهیار در حوضه رودخانه زاینده‌رود در اصفهان، کانال اصلی شبکه آبیاری بهبهان، کانال شهید چمران اهواز، کانال انتقال آب خدا آفرین در استان‌های آذربایجان شرقی و اردبیل (Pourmehr and Dargahi, 2002; Abbaspour et al., 2008; Makvendi and Etezadi, 2011)، افزایش فاصله بین عدسی‌های رسی به میزان ۳۰۰-۷۵ برابر در پی انحلال رگه‌های گچی در مخزن سد گتوند علیا (Kiani et al., 2008) تغییر فرم سازند گچساران و فرونشست حدود ۵۳ سانتی‌متری ناشی از انحلال در محدوده معدن نمک عنبل واقع در سد گتوند علیا (Hashemifard et al., 2018) و ایجاد فرسایش شدید در مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان به دلیل حضور و انحلال‌پذیری خاک‌های گچی (Jowkar et al., 2019) اشاره کرد.

حال‌آنکه کارست‌های گچی علیرغم رخداد گسترده و اهمیت وابسته به آن ازلحاظ کاربردی (مخاطرات، اثرات و منابع) کمتر مورد توجه قرارگرفته‌اند به‌نحوی‌که مطالعات در زمینه کارست‌های گچی از دهه ۱۹۹۰ آغاز گردیده و به‌تدریج در حال گسترش است (Klimchouk, 1996). در این پژوهش با توجه به حساسیت پروژه و مکان‌سنجی استقرار مخازن بزرگ پتروشیمی در مرحله اول قبل از ایجاد دست‌خوردگی در محیط از روش ژئوفیزیکی (GPR) جهت شناسایی حفرات زیرسطحی گچی و ارزیابی لایه‌بندی زیرسطحی استفاده گردید، سپس نتایج با اطلاعات بالغبر ۱۱۳ گمانه حفاری با عمق بین ۴۰-۲۰ که در سایت پتروشیمی به‌منظور انجام آزمون نفوذ استاندارد (SPT) حفرشده بود، تلفیق‌شده و بر این اساس، شناسایی حفرات زیرسطحی گچی تکمیل و مورد جمع‌بندی قرار گرفت. در ادامه الگوی زهکشی و آب زیرزمینی منطقه تعیین و سپس انطباق کارست‌های گچی با وضعیت آب زیرزمینی و نتایج آزمایش SPT گمانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. درنهایت نیز ضمن بررسی شیمی آب زیرزمینی تلاش گردید پیشنهادهایی جهت حل مسئله کارست‌های گچی در منطقه ارائه گردد.

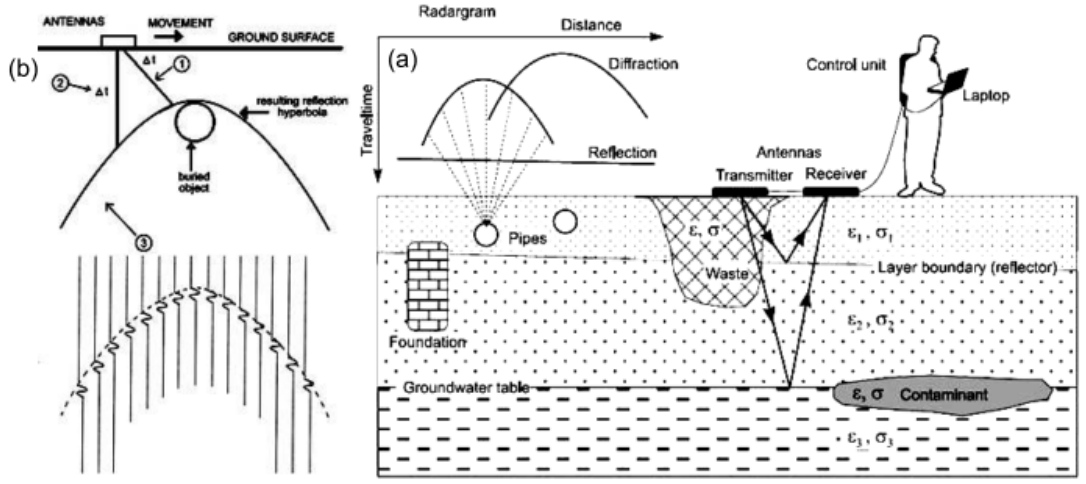
مبانی نظری و فیزیکی روش رادار نفوذی زمین (GPR)

در سال‌های اخیر، پیشرفت روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل پیشرفت علوم و فناوری، توسعه تجهیزات صحرایی و همچنین حسابگرهای رقومی که در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی کاربرد فراوانی دارند بسیار سریع بوده است. در این میان سیستم‌های راداری به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود از قبیل قابلیت استفاده در شب، انرژی بالا (به دلیل داشتن طول‌موج در حد سانتی‌متر)، قابلیت عبور از موانعی نظیر ابر و مه، توانایی تشخیص تغییرات جزئی توپوگرافی زمین، حساسیت به تفاوت‌های موجود در حجم رطوبت خاک، سرعت انتشار امواج آن و توانایی ارائه اطلاعاتی پیرامون موقعیت، اندازه، سرعت و حتی طبیعت جسم، ابزاری حائز اهمیت در بین ابزارهای شناخت پدیده‌ها محسوب می‌شوند (Rashydian et al., 2023). که در این میان، روش رادار نفوذی زمین جایگاه ویژه‌ای در این سیستم‌ها به دلیل ارزیابی غیرمخرب مهندسی پیداکرده است ولی این روش نیز علیرغم مزیت‌های فراوان دارای معایبی می‌باشد. چنانچه، سبکی، قابلیت حمل و استفاده آسان، قیمت نسبتاً ارزان، تولید داده‌های سه‌بعدی (موقعیت افقی و عمق اشیاء) باقدرت تفکیک بالا، پوشش مساحت قابل‌توجه در زمان کوتاه، عدم نیاز به منبع انرژی خارجی (فعال بودن سیستم)، عدم تخریب محیط‌زیست و ایجاد خطر برای سلامتی موجودات زنده، عدم نیاز به تعداد زیاد اپراتور، عدم نیاز به تخصص بالا در جمع‌آوری داده، امکان آنالیز عمق و موقعیت لحظه‌به‌لحظه اجسام، مدل‌سازی اشیای غیرفلزی علاوه بر اشیاء فلزی (ارجحیت نسبت به فلزیاب‌های معمولی)، قابلیت نفوذ در محیطی غیر از هوا و عمل کردن در محدوده وسیعی از فرکانس‌ها از جمله مزایای سیستم GPR می‌باشد

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

Eyuboglu et al., 2003; Cist and Schutz, 2005;) Giannopoulos, 2005; Soldovieri et al., 2011)، و عملکرد ضعیف در محیط‌های آلوده، مرطوب و دارای پوشش گیاهی، قیمت بالا نسبت به فلزیاب، نیاز به پردازش سنگین داده‌ها، میزان نفوذ متغیر و وابسته بودن به پارامترهای گوناگون ازجمله جنس محیط، داشتن داده اولیه غیرقابل درک به‌خصوص برای عوام و افراد مبتدی، پایین بودن کیفیت امواج برگشتی نسبت به سیستم‌های راداری معمولی و پردازش سخت‌تر به دلیل کیفیت پایین داده نیز ازجمله معایب سیستم GPR است (Herman, 1997; Knödel et al., 2007; Soldovieri et al., 2011). در این روش به زبان ساده از امواج الکترومغناطیس جهت کاوش لایه‌های مختلف زمین استفاده می‌گردد بدین منظور با استفاده از یک آنتن فرستنده امواج رادیویی در محدوده فرکانسی متغیر ۱۰-۱۰۰۰ MHz (با توجه به عمق منطقه مورد مطالعه) و یک حسگر گیرنده امواج بازتابی از زمین شامل موج مستقیم هوایی (Direct Air Wave)، موج مستقیم زمینی (Direct Ground Wave) و سپس بازتاب‌های زیرسطحی را جهت تعیین، تشخیص، عمق، شکل، دی‌الکتریک و جنس هدف دریافت می‌کند. بنابراین اساس روش GPR بر پایه پاسخ محیط انتشار موج یا میدان الکترومغناطیسی تولیدشده توسط آنتن فرستنده به ویژگی‌های الکترومغناطیسی محیطی که شامل گذردهی الکتریکی (Dielectric Permittivity)، رسانندگی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی (Magnetic Permeability) می‌باشد، استوار است (Jol, 2009). در میان ویژگی‌های الکترومغناطیسی یادشده، گذردهی الکتریکی مهم‌ترین پارامتر کنترل‌کننده امواج الکترومغناطیس در محیط انتشار آن امواج است. انرژی امواج که در مواد پخش می‌شود، در سطح مشترک دو ماده با ضریب دی‌الکتریک متفاوت تضعیف شد، بازتاب یا شکسته می‌شود و موج تابیده‌شده از این فصل مشترک قابل آشکارسازی است. بررسی خصوصیات سیگنال‌های ثبت‌شده مانند سرعت و میرایی می‌تواند اطلاعات فیزیکی و هندسی مواد را ارائه کند که دستگاه رادار نفوذی زمین این سیگنال‌ها را اندازه‌گیری می‌کند و بازتاب از ساختارهای زیرسطحی را نمایش می‌دهد (Madhoushi and Hatefnia, 2022). متداول‌ترین شیوه نمایش داده‌های GPR، نمایش دامنه سیگنال امواج بازتابی، در مقابل زمان تأخیر است که تریس (Trace) نامیده می‌شود. دستاورد یک برداشت پروفیلی داده‌های GPR، مجموعه‌ای از تریس‌ها در کنار یکدیگر بوده که نگاشت راداری (Radar gram) نام دارد (شکل۱) در روش GPR، نتایج برداشت، به‌صورت تصاویر دوبعدی و سه‌بعدی ارائه می‌شوند و رخداد حاصل در تصویر دوبعدی نیز برای اغلب اهداف مدفون به‌صورت هذلولی است (شکل ۱) (Ahmadi and Fathianpoor, 2016). با اینکه، GPR یک روش ژئوفیزیکی غیر مخرب و مناسب برای شناسایی حفره‌ها و اهداف مدفون به شمار می‌آید. ولی بااین‌حال، عمق برخورد رادار نفوذی زمین (GPR) که به‌عنوان عمق نفوذ نیز شناخته می‌شود، به فرکانس آنتن، رطوبت خاک، مقدار رس، رسانایی الکتریکی مواد زمین و گذردهی دی‌الکتریک بستگی دارد. بنابراین انتخاب فرکانس نیاز به ارزیابی شرایط خاص سایت برای تخمین دقیق عمق نفوذ دارد (Annan and Cosway, 1994; Jol, 1995; Wunderlich and Rabbel, 2013; Caselle et al., 2020). زیرا رطوبت بالا یا خاک‌های غنی از رس، انرژی الکترومغناطیسی را به‌سرعت جذب می‌کنند و عمق نفوذ را تا کمتر از ۱ متر کاهش می‌دهند. حال‌آنکه، خاک‌ها و سنگ‌های خشک و مقاوم، منجر به نفوذ سیگنال در اعماق بیشتر می‌شوند (Fenning and Hasan, ;Hendrickx et al., 2003 1995; Matthews et al., 2000).



شکل ۱. a) اصول روش GPR همراه با نمایش بعضی از کاربردهای آن، b) برداشت داده‌های GPR روی یک هدف مدفون (نیمه بالایی شکل) و پاسخ هذلولی شکل آن در نیمه پایین شکل (خط‌چین در نگاشت راداری)

Fig. 1. a) Illustrates the principles of Ground Penetrating Radar (GPR), highlighting its various applications, b) Demonstrates data collection on a buried target, with its hyperbolic response displayed on a radar map.

همچنین با توجه به‌اندازه و جنس هدف، تشخیص اهداف بزرگ‌تر یا با کنتراست بالاتر در عمق آسان‌تر است. بااین‌حال، اشیاء فلزی، سیگنال‌ها را به‌طور کامل مسدود می‌کنند. درمجموع در شرایط بهینه، GPR می‌تواند از ۱۴ متر تا ۲۸ متر در فرکانس‌های ۲۵ تا ۲۰۰ مگاهرتز نفوذ کنند (Jol, 1995)؛ با این تفاوت که در فرکانس‌های پایین عمیق‌تر نفوذ می‌کند اما با وضوح پایین‌تر و در فرکانس‌های بالاتر، جزئیات دقیق‌تر اما عمق کمتری را ارائه می‌دهد. علاوه بر این تفسیر پروفایل‌های پایین (۵۰ مگاهرتز) در مقایسه با فرکانس‌های بالاتر دشوارتر است چون اغلب به پردازش قابل‌توجهی برای حذف نویز و حفظ کیفیت تصویر در عین حفظ نفوذ عمقی نیاز دارند (Zhou and Sato, 2001; Hager and Carnevale, 2006; Sucre et al., 2011; Liu et al., 2024)، چنانچه گزارش‌شده GPR با فرکانس ۵۰ مگاهرتز می‌تواند رخساره‌های شنی را تا عمق بیش از ۳۰ متر تشخیص دهد و فرکانس‌های بالاتر (۱۰۰ و ۲۰۰ مگاهرتز) در اعماق کمتر از ۲۳ و ۱۷ متر دچار افت سیگنال می‌شوند (Smith and Jol, 1992). همچنین حداکثر عمق نفوذ احتمالی آنتن‌های GPR در رسوبات کواترنری به شرح زیر تعیین‌شده است: ۲۵ مگاهرتز تا ۵۲ متر، ۵۰ مگاهرتز تا ۴۷ متر، ۱۰۰ مگاهرتز تا ۳۷ متر و ۲۰۰ مگاهرتز تا ۲۸ متر (Smith and Jol, 1995). بنابراین می‌توان گفت یک‌روند خطی بین فرکانس آنتن و عمق نفوذ وجود دارد و در این راستا محققان اغلب باید از چندین مرحله پردازش برای استخراج اطلاعات مفید از داده‌های فرکانس‌های پایین و بالا در منطقه استفاده کنند (Nobes and Deng, 2018). علاوه بر موارد اشاره‌شده، گچ و سولفات نیز می‌توانند با تغییر خواص الکترومغناطیسی خاک‌ها، عمق رادار نفوذی به زمین را به‌طور قابل‌توجهی تغییر دهند. زیرا خاک‌های گچی، ویژگی‌های سیگنال رادار غیرعادی، با سرعت انتشار بالاتر و نرخ تضعیف پایین‌تر از حد انتظار، از خود نشان می‌دهند، البته سیگنال‌های رادار به طرز شگفت‌آوری تحت تأثیر مولکول‌های آب متصل به مواد شیمیایی قرار نمی‌گیرند (Koh and Wakeley, 2011). همچنین بین مقاومت الکتریکی و محتوای سولفات رابطه معکوس وجود دارد (Dafalla and Alfouzan, 2023)، بنابراین می‌توان گفت کانی‌شناسی خاک همچون وجود گچ می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی بر سرعت امواج رادار تأثیر گذاشته و بسته به

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

رطوبت خاک، ترکیب مواد معدنی و تخلخل، تصویربرداری GPRرا پیچیده کند (Pipan et al., 2003; Caselle et al., 2020). بااین‌حال شواهد بررسی GPR در محیط‌های ژیپسی - گچی محدود است و نیاز به انجام تحقیقات جامع‌تری برای تعیین دقیق تأثیر دقیق گچ بر کیفیت تصویر GPR است. درنهایت ذکر این مسئله ضروری است که اگرچه اکثر سیستم‌های GPR معمولی به بررسی‌های کم‌عمق محدود می‌شوند، ولی امروزه سیستم‌های تخصصی ولتاژ بالا می‌توانند تصویربرداری زیرسطحی بی‌سابقه‌ای را ارائه دهند. چنانچه فناوری‌های پیشرفته GPR مانند سیستم Roteg قابلیت‌های نفوذ فوق‌العاده‌ای را نشان داده‌اند و ویژگی‌های کارست را در اعماق ۴۰ تا ۲۱۰ متر تشخیص می‌دهند و در شرایط بهینه، حتی به بازتاب‌هایی در اعماق ۴۸۰ تا ۸۵۰ متر نیز می‌رسند (Caselle et al., 2020; Kalenda et al., 2020; Kalenda and Tengler, 2022).

ارزیابی ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی کارست‌های زیرسطحی گچی

اگرچه با توجه به بالا بودن قابلیت انحلال ژیپس‌های سازند گچساران و سازندهای کربناته، کارست یک پدیده رایج و توسعه‌یافته در فلات‌های ایران خصوصاً در کوه‌های زاگرس می‌باشد. اما باوجود گسترش زیاد سنگ‌های ژیپسی در ایران، پژوهش‌ها به موضوع شناخت قابلیت انحلال این نوع سنگ‌ها به روش سیرکولاسیون محدودشده است. که بررسی انحلال‌پذیری ژیپس‌های سازند گچساران در محل سد تنگ شمیران ایلام (Baghdardokht, 2005)، ارزیابی میزان انحلال ژیپس‌های سازند آغاجاری در ساختگاه سد خیرآباد بهبهان (Mousavi, 2006)، تعیین انحلال ژیپس‌های سازند گچساران در سد تنگ سرخ (Parhizkar, 2007)، مطالعه انحلال‌پذیری ژیپس‌های سازند گچساران در محل سد چم‌شیر (Torabi, 2010) و بررسی انحلال‌پذیری ژیپس‌های سازند گچساران در منطقه رامهرمز (Mohammadian, 2012)، مقایسه ضریب ثابت انحلال مصالح ژیپس و انیدریت در سد مراش زنجان (Bazargan and Moazzami, 2021) نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام‌شده است. نتیجه این پژوهش‌ها، لزوم توجه به انحلال ژیپس و احتمال فرار آب از طریق این سنگ‌ها بوده است.

از نتایج گمانه‌های ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی نیز می‌توان در جهت شناسایی لایه‌های زمین‌شناسی و وضعیت زیرسطحی زمین استفاده کرد ولی لازم به ذکر است این روش بسیار گران است و همچنین ممکن است یک گمانه فقط چند سانتی‌متر از یک کارست گچی بالقوه و بزرگ فاصله داشته باشد. در این روش در زمان حفاری، افت راد و عمق حضور حفره به‌صورت دستی و خودکار ثبت می‌گردد (Cailleux and Toulemont, 1982; Patterson et al., 1995; Gracia et al., 2024). در ادامه با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی موقعیت آن‌ها با تصاویر ماهواره‌ای قدیمی و نقشه‌های آب زیرزمینی منطقه جهت بررسی محل تجمع و شناسایی عوامل مؤثر در تشکیل آن‌ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. درنهایت از پژوهش‌های صورت گرفته در خصوص استفاده از روش‌های رادار نفوذی زمین، ژئوتکنیک و زمین‌شناسی مهندسی در مطالعه و بررسی کارست‌های گچی زیرسطحی می‌توان به پژوهش‌های ذیل اشاره کرد.

قبادی و موسوی (Ghobadi and Mousavi, 2007) خصوصیات فیزیکی و میزان انحلال‌پذیری نمونه‌های سنگ ژیپسی را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند میزان انحلال‌پذیری آن‌ها ۱۰-۶ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. گوتیرز و همکاران (Gutierrez et al., 2008a) فاکتورهای اصلی کارستی شدن در سازندهای تبخیری را ۵ عامل: ۱. ترکیب تبخیری‌ها و تعداد آبخوان‌هایی که در مجاورت آن‌ها قرار دارند، ۲. ساخت و بافت سنگ‌های قابل انحلال و آبخوان‌های مجاور آن‌ها، ۳. مقدار جریان آب که در تماس با تبخیری‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

بوده همچنین خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها، ۴. نوع جریان و شرایط آب زیرزمینی و ۵. تغییرات سطح آب یا سطح پیزومتری دانستند. باربا و همکاران (Barba et al., 2009) با استفاده از روش GPR با آنتن‌های فرستنده ۴۰۰-۲۰۰ مگاهرتز به ارزیابی مطالعات باستان‌شناسی و اکتشاف پهنه‌های کارستی شده پرداختند. پروخورنکو و همکاران (Prokhorenko et al., 2009) با استفاده از روش ژئوفیزیکی GPR به شناسایی و بررسی حفره‌های ناشناخته غار گچی کشف‌شده موشکاروا یاما (Mushkarova Yama) در اوکراین پرداختند و گزارش کردند ورودی غار در پایین فروچاله است و بر اساس نقشه‌برداری کنونی طول غار بیش از ۵۰۰۰ متر است و برخی از گالری‌های شناخته‌شده تا عمق ۱۲ متری از سطح زمین قرار دارند. ایسترادا – مدینا و همکاران (Estrada-Medina et al., 2010) به بررسی حفره‌های انحلالی و کارستی، سنگ‌بستر آهکی با استفاده از نگاشت‌های راداری به‌دست‌آمده از آنتن ۲۰۰ مگاهرتز GPR پرداخته و گزارش کردند این نگاشت‌ها عموماً از وضوح خوبی تا عمق ۳ تا ۵ متر برخوردار بودند و همچنین گمان می‌رود منابع اصلی تضعیف سیگنال GPR، محتوای بالاتر رس، آب و مواد خاکی موجود در حفره‌های زیرین باشد. کریمی (Karimi, 2011) سازوکار تشکیل فروچاله‌های سطحی دشت جابر ایلام را مورد بررسی قرار داده و گزارش کردند این فروچاله‌ها در سازند گچساران تشکیل‌شده و اکثراً از نوع ریزشی بوده که به دلیل نوسانات آب زیرزمینی در منطقه تشکیل‌شده‌اند و از دیدگاه مهندسی به‌عنوان کارست بالغ تلقی می‌گردند. محمدی ویژه و کامکار روحانی (Mohamadi Vizheh and Kamkar Rouhani, 2011) به بررسی استفاده از روش GPR در شناسایی عمق آب‌های زیرسطحی، حفرات و ساختارهای مدفون در عمق کم در یک قنات واقع در شهرستان شاهرود پرداخته و گزارش کردند که با استفاده از این روش امکان اندازه‌گیری ژرفای آب زیرسطحی وجود دارد. ملکی و اویسی (Maleki and Ovaisy , 2012) با استفاده از GPR به بررسی چشمه‌های کارستی سراب یاوری و سراب نیلوفر در استان کرمانشاه پرداخته و گزارش کردند میزان انحلال در چشمه سراب نیلوفر که دورتر از زون شکسته و نزدیک به زون زاگرس چین‌خورده واقع‌شده به‌مراتب کمتر از چشمه سراب یاوری می‌باشد. ناصری و نیک قوجق (Naseri and Nikghojagh, 2012) با ارزیابی انتقال آلاینده‌ها از سد باطله آق دره گزارش کردند به دلیل وجود گچ و ژیپس در مخزن و پی سد مجاری انحلالی شکل‌گرفته و از این طریق نشت آلاینده به پایین‌دست صورت می‌گیرد. کامکار روحانی و همکاران (Kamkar Rouhani et al., 2013) امکان شناسایی حفره‌های زیرسطحی، بررسی لایه‌بندی رسوبات زیرسطحی کم‌عمق و بررسی میزان رطوبت لایه‌های متفاوت زیرسطحی در منطقه خانیاب شاهرود را با استفاده از پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی زمین گزارش کردند. لوج و همکاران (Łój et al., 2014) به ارزیابی ژئوفیزیکی و ارائه مدل برای شناختن کارست‌های گچی رسوبات گچی نیدا (Nida) در لهستان پرداخته و گزارش کردند شکل و ساختار حفرات کارست‌های گچی پیچیده بوده و تنها آنالیز ژئوفیزیکی سه‌بعدی می‌تواند اطلاعات مربوط به پهنه‌های شکستگی‌ها، مناطق ضعیف و خصوصیات توده سنگ را نشان دهد. محمدیان و همکاران (Mohammadian et al., 2015) با بررسی انحلال‌پذیری سنگ‌های ژیپسی سازند گچساران در شرق خوزستان، فراوانی درزه‌ها و گسل‌ها و عملکرد آب زیرزمینی را از عوامل تشکیل کارست گچی در منطقه دانستند. ساری و بکتاش (Sari and Bektaş, 2015) از GPR با فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز برای آشکار کردن اینکه مناطق گچی مرکز شهر سیواس حاوی شکستگی‌ها، ترک‌ها و فضاهای انحلالی هستند، استفاده و گزارش کردند مناطق با بازتاب‌های قوی (عمق ۵ متر)، که در مقاطع رادار

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

زمینی نشان داده‌شده‌اند توده‌های گچی عظیم همگنی نیستند که در مطالعات زمین‌شناسی ارائه‌شده‌اند و حاوی مواد پرکننده (مواد آواری) با اندازه و موقعیت متفاوت هستند، بنابراین گچ در این منطقه حاوی شکستگی‌ها، ترک‌ها، پرشدگی‌ها و فضاهای انحلالی است. گولبیوسکی و جاروسینکا (Gołębiowski and Jarosińska, 2019) برای تشخیص اشکال کارستی و سنگ‌بستر هوازده از روش‌های ژئوفیزیکی GPR و ERT استفاده و اشکال کارستی کم‌عمق در رسوبات گچی که ممکن است پایداری سطح زمین، ساختمان‌ها و همچنین زیرساخت‌های روی زمین را تهدید کند را نهایت تا عمق فونداسیون ساختمان‌ها (عمق حداکثر ۱۰ متر) با این روش‌ها گزارش کردند. طاوسی و همکاران (Tavosi et al., 2018) میزان انحلال‌پذیری و اثر آن بر کیفیت آب مخزن سد پارسیان را بررسی کرده و گزارش کردند سرعت انحلال سازند گچساران در داخل مخزن سد ۱۲-۴ سانتی‌متر در سال می‌باشد. کاسل و همکاران (Caselle et al., 2020) خطر کارست در معادن زیرزمینی گچ را با استفاده از رادار نفوذی زمین (GPR) مورد بررسی و تجزیه‌وتحلیل قرار داده و گزارش کردند این روش به دلایل غیر مخرب بودن، هزینه‌های اقتصادی به‌صرفه، وضوح‌بالا در چارچوب‌های پیچیده زمین‌شناسی و در مناطق تحت شرایط خاص به‌ویژه برای شناسایی توده‌های آبی، شکاف‌ها و سنگ‌های کارایی بالایی دارد. گو و همکاران (Guo et al., 2020) مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌گیری کارست‌های گچی را توپوگرافی، تکتونیک و سطح آب زیرزمینی و همچنین فعالیت‌های انسان ذکر کردند. اوزل و داریجی (Özel and Darıcı, 2020) با استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به بررسی خطر کارست‌های گچی شهر سیواس (Sivas) ترکیه پرداخته و گزارش کردند مقاومت‌ها و سرعت‌های لرزه‌ای گچ در ناحیه مسطح در مقایسه با ناحیه فرورفتگی به دلیل وجود کارست بیشتر بود و با توجه به ایجاد نواحی با مقاومت کم در مواد نفوذپذیر و حضور آب‌های زیرزمینی در نزدیکی سطح زمین، ساختار کارست‌ها احتمالاً در این منطقه به توسعه خود ادامه خواهند داد. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2020) گزارش کردند دوغاب‌های با پایه سیمان فسفاته به دلیل پیوند بین سطحی خوب و گیرش نهایی آنی، برای گرفتگی دینامیکی مجاری آب در مناطق کارستی مناسب هستند و همچنین افزودن خاکستر بادی بر زمان‌گیرش، مقاومت فشاری و ویسکوزیته آن تأثیر می‌گذارد. لی و همکاران (Li et al., 2021) گزارش کردند با استفاده از یک دوغاب پلیمر فوق جاذب با نسبت انبساط ۱:۳۰۰، متشکل از پلیمر سوپرجاذب، گلیسرول و اتانول می‌توان به‌طور مؤثری هجوم آب را در محیط‌های کارستی را مسدود کرد. به‌نحوی‌که استفاده ۸۰۰ گرم از این دوغاب پلیمری منجر به انسداد جریان آب با سرعت ۰/۶ متر بر ثانیه می‌شود. ژای و همکاران (Zhai et al., 2022) خواص دوغاب، پارامترهای شکستگی، پارامترهای تزریق و فشار آب را پارامترهای مؤثر بر فرآیند انتشار دوغاب در محیط کارستی دانسته و فشار تزریق ۱۲ مگا پاسکال را برای شعاع نفوذ دوغاب ۲۰ متری در یک سفره آب زیرزمینی کارستی معدن زغال‌سنگ توصیه کردند. ژانگ و همکاران (Zhang et al., 2022) ضمن مطالعه هجوم آب از آبخوان‌های کارستی به معادن زغال‌سنگ شمال چین، جهت پیشگیری و کنترل چنین تهدیدی اجرای فناوری تزریق با فشار مناسب را به‌نحوی‌که منجر به توسعه کارست و شکستگی نگردد را ضروری دانستند. همچنین آن‌ها با استفاده از معادلات برنولی، معیار مقاومت هوک – براون و تحلیل شکست هیدرولیکی، فشار بحرانی تزریق را ۱۴/۵۴ مگا پاسکال گزارش کردند. ژای و بای (Zhai and Bai, 2022) برای جلوگیری از فاجعه هجوم آب به معادن زغال‌سنگ چین بر اساس ۱- رفتار وابسته به زمان دوغاب تزریق‌شده، ۲- پاسخ سنگ و ۳- تعامل بین دوغاب و سنگ، یک طرح تزریق با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

شعاع انتشار دوغاب ۲۰ متر و فشار تزریق ۸ مگا پاسکال پیشنهاد کردند که می‌تواند مرجعی برای یک پروژه تزریق در آبخوان کارستی باشد. انتظاری و همکاران (Entezari et al., 2022) با ارزیابی رشد فروچاله‌های سطحی گچی و مخاطرات ناشی از آن در دشت مارون گزارش کردند عمر شکل‌گیری یک فروچاله با حجم ۳۷۶ مترمکعب ۶۹ سال است که کمتر از میانگین عمر یک انسان محسوب می‌شود بنابراین این نرخ انحلال بالا و وجود حفرات زیرزمینی می‌تواند خطر ریزش‌های ناگهانی به‌ویژه در مناطق مسکونی و کشاورزی را به دنبال داشته باشد. آماناتیدو و همکاران (Amanatidou et al., 2022) گزارش کردند ترکیب روش‌هایی ژئوفیزیکی مانند ERT، توموگرافی انکساری لرزه‌ای و تحلیل چند کاناله امواج سطحی، قابل‌اعتمادترین روش تشخیص حفره را ارائه می‌دهند. امین و همکاران (Amin et al., 2023) با استفاده از روش GPR حفره‌های زیرسطحی در دشت ابرکوه یزد را تا عمق ۵ متری مورد مطالعه و بررسی قراردادند و نواحی بدون خطر را به‌عنوان شاهد در مسیر شمال غرب به غرب برای اقدامات زیرساختی مانند خطوط انتقال نیرو، سوخت و احداث راه‌آهن مشخص کردند. وو و همکاران (Wu et al., 2024) گزارش کردند دوغاب‌هایی با ویسکوزیته بیش از ۳۰ میلی‌پاسکال بر ثانیه، دارای قطر ذرات ۱/۵ میلی‌متر (اندازه ذرات، نصف عرض شکستگی) و چگالی ذرات gr/cm^3 ۲-۲/۶ عملکرد پراکندگی و انسداد خوبی را نشان می‌دهند. گراسیا و همکاران (Gracia et al., 2024) خطر کارست‌ها و فرونشست ناشی از آن‌ها را در امتداد مسیر دسترسی به شهر گالور (Gallur) اسپانیا مورد بررسی قرار دادند و درنهایت تحکیم زمین از طریق تزریق ملات کم‌تحرک در هسته منطقه فرونشست (با فشارهای بسیار بالا تا ۶ مگا پاسکال) و ساخت یک خاک‌ریز مسلح با استفاده از ژئوگریدهای با مقاومت کششی بالا در امتداد کل بخش خیابان آسیب‌دیده را به‌عنوان پیشنهادهای فنی مورد نظر جهت کاهش خطر کارست گچی ارائه دادند. احمد و همکاران (Ahmad et al., 2025) گزارش کردند کارست‌های تبخیری نقش مهمی در فرونشست منطقه پرجمعیت کاراک (Karak) در دامنه رشته‌کوه هیمالیا ایفا می‌کند به‌نحوی‌که آن‌ها با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری گزارش کردند که منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۲۳-۲۰۱۴ با نرخ mm/year ۲۹ دچار نشست شده است.

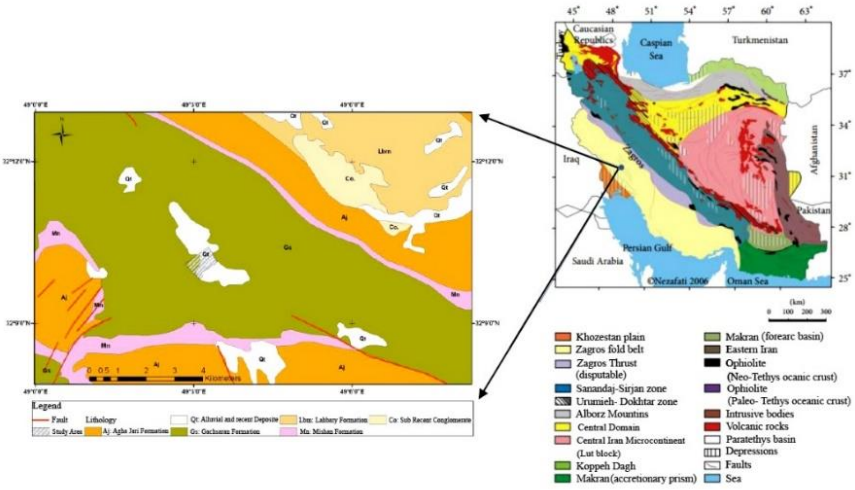
بنابراین همان‌طور که اشاره شد حضور و توسعه کارست‌ها و حفرات در بسترهای گچی واقع در زیر سازه‌های ژئوتکنیکی یک تهدید بزرگ مهندسی است. زیرا آن‌ها به‌سرعت شکل می‌گیرند و رشد می‌کنند و می‌توانند منجر به مقادیر قابل‌توجهی نشست گردند ولی با توجه به ماهیت زیرسطحی آن‌ها، شناسایی و بررسی آن‌ها بسیار پیچیده بوده لذا در این پژوهش با در نظر گرفتن مزایا و معایب هرکدام از روش‌های موردمطالعه، از تلفیق روش ژئوفیزیکی (GPR) و ژئوتکنیکی (حفر گمانه) جهت شناسایی و بررسی کارست‌های گچی در مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان استفاده گردید به‌نحوی‌که این روش‌ها بتوانند معایب یکدیگر را پوشش دهند و به بالاترین کارایی در ارزیابی هدف پروژه دست‌یافت درنهایت نیز موقعیت کارست‌های گچی شناسایی‌شده با الگوی زهکشی سطحی، آب زیرزمینی و نتایج آزمایش SPT مورد ارزیابی قرار گرفت.

موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره طرح

مجتمع پتروشیمی اوره و آمونیاک مسجدسلیمان با مساحت حدود ۵۱۰ هزار مترمربع در منطقه‌ای با طول جغرافیایی ۴۹/۰۵ و عرض جغرافیایی۳۲/۱۶ در سی‌وپنج کیلومتری شمال غربی شهرستان مسجدسلیمان در استان خوزستان، در مجاورت روستای هفت شهیدان واقع‌شده است. منطقه موردمطالعه مطابق شکل ۲ در پهنه زمین‌شناسی فروافتادگی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

دزفول بر روی سازند گچساران (حاوی خاک‌های ریزدانه گچ دار و سنگ‌های تبخیری) و نهشته‌های کواترنری قرارگرفته است در این منطقه رشته‌کوه‌های زاگرس هماهنگ با عناصر ساختاری اصلی این پهنه زمین‌ساخت در راستای شمال غرب، جنوب شرق کشیده شده‌اند. شیب توپوگرافی دامنه‌ها و دیواره‌ی آبراهه‌ها متأثر از وجود سازندهای ضعیف گچساران در منطقه عموماً کم است. تکتونیک منطقه به همراه عملکرد پدیده‌های فرسایش، از اصلی‌ترین عوامل تأثیرگذار در ریخت‌شناسی منطقه هستند.



شکل ۲. موقعیت و نقشه زمین‌شناسی سایت پتروشیمی مسجدسلیمان

Fig. 2. Location and Geological Map of the Masjed Soleyman Petrochemical site

مواد و روش‌ها

در این پژوهش جهت ارزیابی وضعیت زمین‌شناسی زیرسطحی، حفرات و کارست‌های گچی سازند گچساران در ابتدا (قبل از انجام هرگونه آزمایش برجا و تغییری در وضعیت منطقه) از روش ژئوفیزیکی غیر مخرب GPR با آنتن امواج فرستنده ۲۵۰ و ۵۰ مگاهرتز در ۲۴ پروفیل به طول کل ۲۳۰۷ متر (مجموع دو آنتن)، با توجه به لایه‌بندی رس-سیلت گچدار خاک سطحی منطقه جهت ارزیابی عمق مؤثر نفوذ GPR و دستیابی به‌وضوح تصاویر نگاشت راداری مناسب استفاده گردید (شکل ۳). چراکه، فرکانس ۵۰ مگاهرتز کاربرد خود را در پروژه‌ها و پژوهش‌های مختلف ازجمله موارد زیر نشان داده است، ۱- اندازه‌گیری ضخامت یخچال‌های طبیعی و تشخیص سنگ‌بستر در اعماق بیش از ۴۰ متر (Descloitres et al.,1999)، ۲- تشخیص ساختارهای زیرزمینی مانند دیوارهای سنگی در بررسی‌های باستان‌شناسی (Zhou and Sato, 2001)، ۳- توصیف شکستگی توده سنگ در محیط‌های زمین‌شناسی (Jeannin et al., 2006)، ۴- شناسایی کارست‌های گچی از عمق ۳ تا ۱۰ متر (Gołębiowski and Jarosińska, 2019). علاوه بر این، گزارش‌ها حاکی از نفوذ امواج GPR با فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز، تا حدود ۱۳ متر در معادن سنگ‌آهک بوده که نشان‌دهنده پتانسیل آن برای هدایت و بهبود فعالیت‌های استخراج است (Lualdi and Zanzi, 2004)، همچنین عملکرد این فرکانس (۲۵۰ مگاهرتز) در پروژه‌ها و پژوهش‌های مختلف همچون: ۱- تشخیص حفره‌ها و ویژگی‌های کارستی با حداقل ابعاد حدود ۴۰ سانتی‌متر (Pipan et al., 2003) ۲- بررسی حفره‌های انحلالی و کارستی رو سنگ‌بستر آهکی (تا عمق ۳ تا ۵ متر)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

(Estrada-Medina et al., 2010)، ۳- تشخیص حفره‌های واقعی در اعماق ۰/۵ تا ۲ متر (Kim et al., 2016)، تعیین عمق لوله دفن شده تا حدود ۳ متر (Ghazali et al., 2019)، ۴- شناسایی کارست‌ها در جبهه‌های حفاری فضاهای زیرزمینی تا عمق ۴-۳ متری (Caselle et al., 2020)، ۵- ارزیابی بهتر منطقه با خاک رسی – سیلتی نسبت به فرکانس‌های بالاتر (۵۰۰ مگاهرتز) (Al-Khersan et al., 2021) و ۶- شناسایی دیوارهای باستانی با بازتاب‌های واضح تا عمق نفوذ ۴ متر (Kareem and Abd, 2024). در ادامه ازآنجاکه استفاده از فرکانس‌های پایین به دلیل رابطه معکوس بین فرکانس و عمق نفوذ و وضوح نگاشت‌های راداری چالش‌برانگیز بوده بنابراین جهت تصحیحات و پردازش‌های مورد نیاز از نرم‌افزار Reflexw استفاده شد. به‌منظور غلبه بر محدودیت‌های ذاتی و نوفه‌های موجود در داده‌های خام با انجام تصحیحات، تصحیح خطاهای ناشی از برداشت میدانی، حذف سیگنال‌های با فرکانس خیلی کم ناشی از جریان القایی با اعمال فیلتر دی واو (Dewow)، انجام تصحیح ایستا (تصحیح صفر زمانی (Time Zero Correction)، (یعنی اصلاح شروع ثبت داده‌ها تا پالس اولیه (اولین برگشت) در زمان صفر قرار گیرد))، حذف نویزهای مغناطیسی زمینه (Background Removal) (یعنی حذف سیگنال‌های تکراری و غیر مرتبط که در همه رده‌ها ثابت هستند)، اعمال انواع بهره‌ها (Gains) جهت تقویت سیگنال کاهیده شده در عمق و اعمال فیلتر میان‌گذر (Band pass) جهت افزایش نسبت سیگنال به نویز داده‌ها، تبدیل داده‌های زمانی به عمق (Time Depth Coversion) با استفاده از سرعت موج و اصلاح هندسی بازتاب‌ها (یعنی تبدیل سهمی‌های بازتابی به موقعیت واقعی‌شان در فضا (عمل مهاجرت (Migration))، نگاشت‌های راداری پردازش گردیدند. همچنین در زمان برداشت داده‌ها، با استفاده از GPS نصب‌شده روی دستگاه، به ازای هر پروفیل مختصات یک نقطه نیز برداشت‌شده و به‌صورت خودکار در حافظه دستگاه ذخیره شد و به همراه فایل‌های مربوط به داده‌های GPR به کامپیوتر انتقال یافت که در شکل‌های ۳ و ۴ موقعیت کل گمانه‌های ژئوتکنیکی حفرشده (Zamin Physic Pooya Company, 2015) و پروفیل‌های GPR و ارتباط آن‌ها با یکدیگر قابل‌مشاهده است. در ادامه با توجه به حساسیت پروژه جهت بررسی مصالح زیرسطحی ساختگاه، شناسایی حفره‌ها و کارست‌های گچی و دستیابی به نقشه سطح ایستابی زیرزمینی اطلاعات تعداد ۱۱۳ گمانه که تا اعماق ۲۰ تا ۴۰ متری توسط شش (۶) ماشین حفاری، حفر گردیده بود (Zamin Physic Pooya Company, 2015) مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت و از میان آن‌ها اطلاعات گمانه‌هایی که در آن‌ها کارست گزارش‌شده بر روی تصاویر ماهواره‌ی کرونا مربوط به سال ۱۹۶۸ میلادی، تصاویر گوگل ارث و نقشه‌های زهکشی آب‌های سطحی و زیرزمینی (تهیه‌شده با اندازه‌گیری تراز سطح آب گمانه‌ها با استفاده از عمق‌یاب دارای سنسور الکتریکی) پیاده‌سازی و رقومی سازی گردید. درنهایت نیز پس از نمونه‌برداری از آب زیرزمینی در ۵ گمانه، مقادیر اسیدیته (ASTM D1067-16, 2025)، سختی (ASTM D1126-17, 2025)، کلسیم و منیزیم (ASTM D511-14, 2021)، کلرید (ASTM D512-23, 2023)، سولفات (ASTM D516-16, 2016)، پتاسیم (ASTM D3561-16, 2021) و آمونیاک (ASTM D1426-15, 2021) آب تحت عنوان آزمایش‌های شیمی آب (در مجموع در تعداد ۴۰ آزمایش)، مورد اندازه‌گیری قرار گرفت و سپس نتایج آن‌ها بر اساس استاندارد اروپایی مقاومت بتن در شرایط محیطی خاص (STN EN 206-1, 2002) و معیار مقررات ملی ساختمان ایران (ABA) (Ministry of Roads and Urban Development of Iran, 2013; 2019) مطابق جدول ۱ مورد ارزیابی قرار گرفت.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]



شکل ۳. موقعیت کل گمانه‌های ژئوتکنیکی حفرشده

Fig. 3. Geotechnical boreholes locations



شکل ۴. موقعیت پروفیل‌های GPR نسبت به گمانه‌های ژئوتکنیکی حفرشده

Fig 4. Location of GPR profiles in relation to drilled geotechnical boreholes

جدول ۱. مقادیر حدی برای خواص آب زیرزمینی که از نظر شیمیایی بر بتن تأثیر می‌گذارد.

Table 1. Concrete's chemical susceptibility to groundwater properties and their corresponding threshold values

Chemical Characteristic	A) According to STN EN 206-1 Degree of influence			
	Weakly aggressive	Moderately aggressive		Strongly aggressive
Mg^{2+} ppm	300<Value<1000	1000<Value<3000		3000<Value
NH^{4+} ppm	15<Value<30	30<Value<60		60<Value<100
Chemical Characteristic	B1) According to ABA-Degree of influence			
	Negligible	Moderate	Severe	Very Severe
SO_4^{2-} (ppm)	Value<300	300≤Value<1200	1200≤Value<2500	2500≤Value<5000
Chemical Characteristic	B2) According to ABA-Degree of influence			
	Negligible	Moderate	Severe	Very Severe
SO_4^{2-} (ppm)	Value<150	150≤Value<1500	1500≤Value<10000	Value≥10000

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

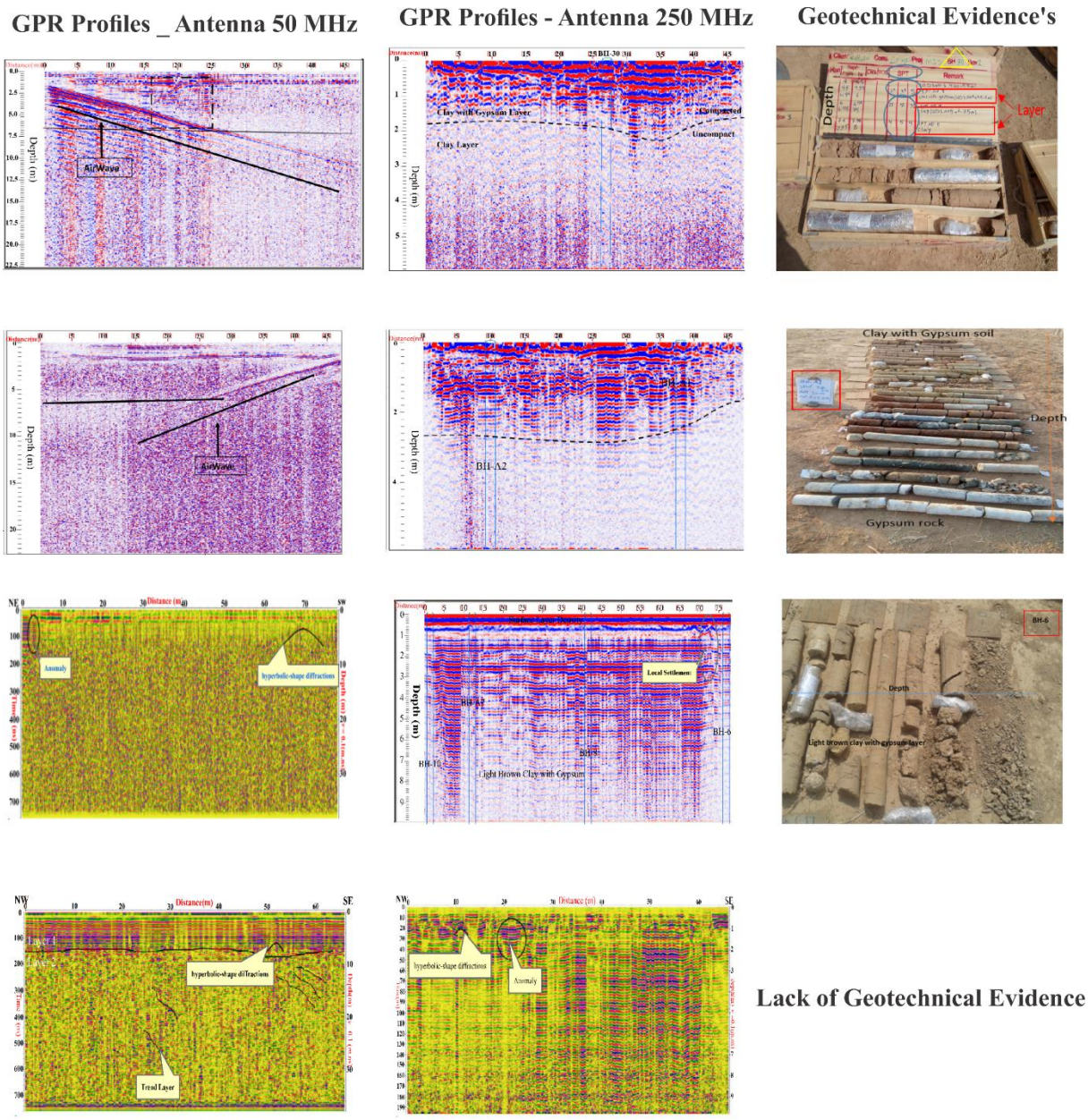
نتایج و بحث

تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی GPR

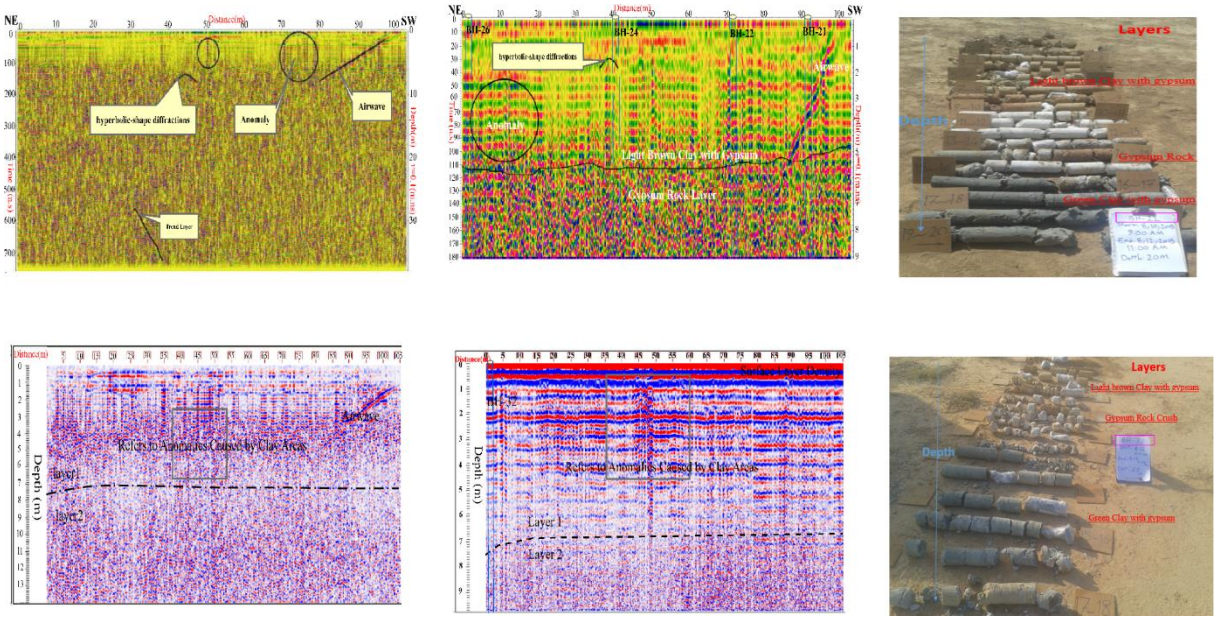
برداشت‌های ژئوفیزیکی GPR در محدوده مورد مطالعه مطابق شکل ۵، حاکی از وجود حفرات، شکستگی‌ها و تغییرات لایه‌بندی در سطح و عمق مرتبط با پهنه‌های رسی و ژیپسی بود. در این راستا پروفیل شماره ۱ به طول ۴۷/۵ متر از محدوده شرق منطقه برداشت گردید که با ارتباط این پروفیل با اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه BH-30 در طول و امتداد ۲۷ متری از مسیر برداشت ژئوفیزیکی GPR مطابق شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۱) می‌توان گفت تا عمق حدوداً ۲-۴ متری زمین از لایه رس گچ دار متراکم (با توجه به اعداد SPT) تشکیل‌شده و بعدازآن لایه رسی با تراکم پایین‌تر وجود دارد. همچنین نگاشت راداری با فرکانس ۵۰ MHZ در این پروفیل حاکی از آن بوده که یک سطح ناهنجاری و آنومالی در فاصله تقریباً ۲۰ متری در لایه سطحی (عمق حدود ۵-۲ متری) وجود دارد که با مستطیل نقطه‌چین مشخص‌شده است. همچنین ناهنجاری مشابه شیب‌های تند موجود در تصویر، مربوط به پدیده امواج هوا (Airwave) بوده و نه یک موضوع زمین‌شناسی، که این مسئله از مشکلات عمده بررسی‌های نگاشت راداری GPR بوده که در اجسام واقع در بالای سطح زمین اغلب در داده‌های GPR دیده می‌شوند و اهداف زیرسطحی مورد نظر را پنهان می‌کنند یا تفسیر آن‌ها را دشوار می‌کنند. پروفیل شمال ۲ به طول ۴۷/۵ متر از محدوده شرق منطقه به فاصله حدود ۱۶ متر پایین‌تر از پروفیل شماره ۱ برداشت گردید با ارتباط این پروفیل با اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های BH-A2 و BH-A1 به ترتیب در طول و امتدادهای ۱۰ و ۳۷ متری از مسیر برداشت می‌توان گفت زمین تا عمق حدوداً ۱۴ متری از رس گچ دار تشکیل‌شده است و بعدازآن مصالح به سنگ ژیپس تبدیل می‌گردند. همان‌طور که در شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۲) مشخص است در این سطح نیز پدیده Airwave واضح است و همچنین در نگاشت راداری با فرکانس ۲۵۰ HZ این پروفیل، لایه سطحی دست‌خورده و متراکم (خط‌چین) قابل‌مشاهده است. پروفیل شماره ۵ به طول ۷۸ متر از محدوده جنوب منطقه برداشت گردید با ارتباط این پروفیل با اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های BH-10، BH-A7، BH-8 و BH-6 به ترتیب در طول و امتدادهای ۱/۵، ۱۳، ۴۳ و ۷۸ متری مسیر برداشت ژئوفیزیکی مطابق شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۳) می‌توان گفت تا عمق ۱۵-۱۸ متری سطح زمین از خاک رس گچ دار تشکیل‌شده است و بعدازآن مصالح زمین‌شناسی عمدتاً سنگ ژیپس می‌باشد همچنین در این پروفیل برخی از ناهنجاری‌ها همچون نشست محلی ناشی از انحلال گچ در خاک سطحی در فاصله ۷۰ متری از این پروفیل تا عمق حدود ۳ متری نگاشت راداری قابل‌مشاهده است. پروفیل شماره ۱۰ به طول ۶۶ متر از قسمت جنوب شرق منطقه برداشت گردید اگرچه جانمایی مسیر برداشت با نقشه گمانه‌های ژئوتکنیکی حاکی از آن بوده که در این مسیر گمانه‌ای حفر نشده است ولی همان‌طور که در شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۴) قابل‌مشاهده است در این بخش نیز تغییر در لایه‌بندی و برخی از روند لایه، نشت‌های ناشی از انحلال را می‌توان تشخیص داد. پروفیل شماره ۱۵ به طول ۱۰۳ متر از مرکز منطقه برداشت گردید با ارتباط این پروفیل با اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های BH-26، BH-24، BH-22 و BH-21 در طول و امتدادهای به ترتیب ۱، ۴۱، ۷۲ و ۹۲ متری از مسیر برداشت مطابق شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۵) می‌توان برخی ناهنجاری‌ها و تغییر در لایه‌ها را مشاهده کرد که.یکی از ناهنجاری‌ها به Airwave اشاره دارد و دیگری احتمالاً ناهنجاری‌ها مرتبط با پهنه‌های رسی تا عمق ۱۰ متری را نشان می‌دهد. همچنین می‌توان روند لایه‌ها را عمق حدود ۳۰-۲۰ متر مشاهده کرد. پروفیل شماره ۲۰ به طول ۱۰۵/۵ متر از جنوب منطقه برداشت گردید. با ارتباط این

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

پروفیل با اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه BH-32 در ابتدای مسیر برداشت و اطلاعات حاصل از فرستنده‌های ژئوفیزیکی مطابق شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۶) می‌توان ناهنجاری‌ها و آنومالی‌های Airwave، دست‌خوردگی پهنه‌های رسی و تغییرات لایه‌بندی را مشاهده کرد.



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]



شکل ۵ . تفسیر نگاشت‌های راداری با فرکانس MHZ ۲۵۰و ۵۰ مقاطع برداشت GPR با کمک شواهد ژئوتکنیکی گمانه‌ها

Fig. 5. Trace (GPR Mapping) interpretation using 50 and 250 MHz GPR sections, supported by geotechnical data from boreholes

درمجموع می‌توان گفت بر اساس مقاطع عمقی GPR می‌توان علاوه بر تشخیص نوع، بافت و عمق رسوبات سازند گچساران کارست‌های گچی زیرسطحی را شناسایی کرد. چنانچه فرکانس ۵۰ مگاهرتز حداکثر می‌تواند تا عمق ۱۰ متر در منطقه نفوذ کند که این مسئله آن فرکانس را برای بررسی‌های زمین‌شناسی و تشخیص حفرات انحلالی تا آن عمق با توجه به محدودیت آب‌های زیرزمینی سایت پتروشیمی ایدئال می‌کند. بااین‌حال، این فرکانس طول‌موج بلندتری دارد که منجر به کاهش وضوح عمودی و افقی نگاشت‌های راداری می‌شود. فرکانس ۲۵۰ مگاهرتز نیز می‌تواند حداکثر تا عمق حدود ۵ متر منطقه نفوذ کند. بنابراین برای بررسی‌های زمین‌شناسی که در آن‌ها جزئیات دقیق مورد نیاز است، مناسب است. این فرکانس طول‌موج کوتاه‌تری دارد که وضوح تصویر را افزایش می‌دهد و امکان تشخیص ویژگی‌های زیرسطحی کوچک‌تر را فراهم می‌کند، هرچند با دامنه عمق کمتر. بنابراین انتخاب فرکانس GPR در منطقه بر اساس الزامات خاص تحقیق و شرایط زیرسطحی توصیه می‌گردد. چنانچه در این پژوهش بر اساس دو فرکانس۵۰ و ۲۵۰ مگاهرتز حداکثر تا عمق ۱۰ متری آثار حفرات زیرسطحی که در اصطلاح ژئوفیزیکی به آن میرایی سیگنال (Signal Damping) می‌گویند در پروفیل‌ها به‌صورت آثار هذلولی شکل مشاهده شد، هرچند که تعیین خواص الکترومغناطیسی پیچیده گچ و درک کامل و دقیق مکانیسم‌های تأثیر گچ و سولفات بر عمق GPR، مستلزم تحقیقات جامع‌تری می‌باشد.

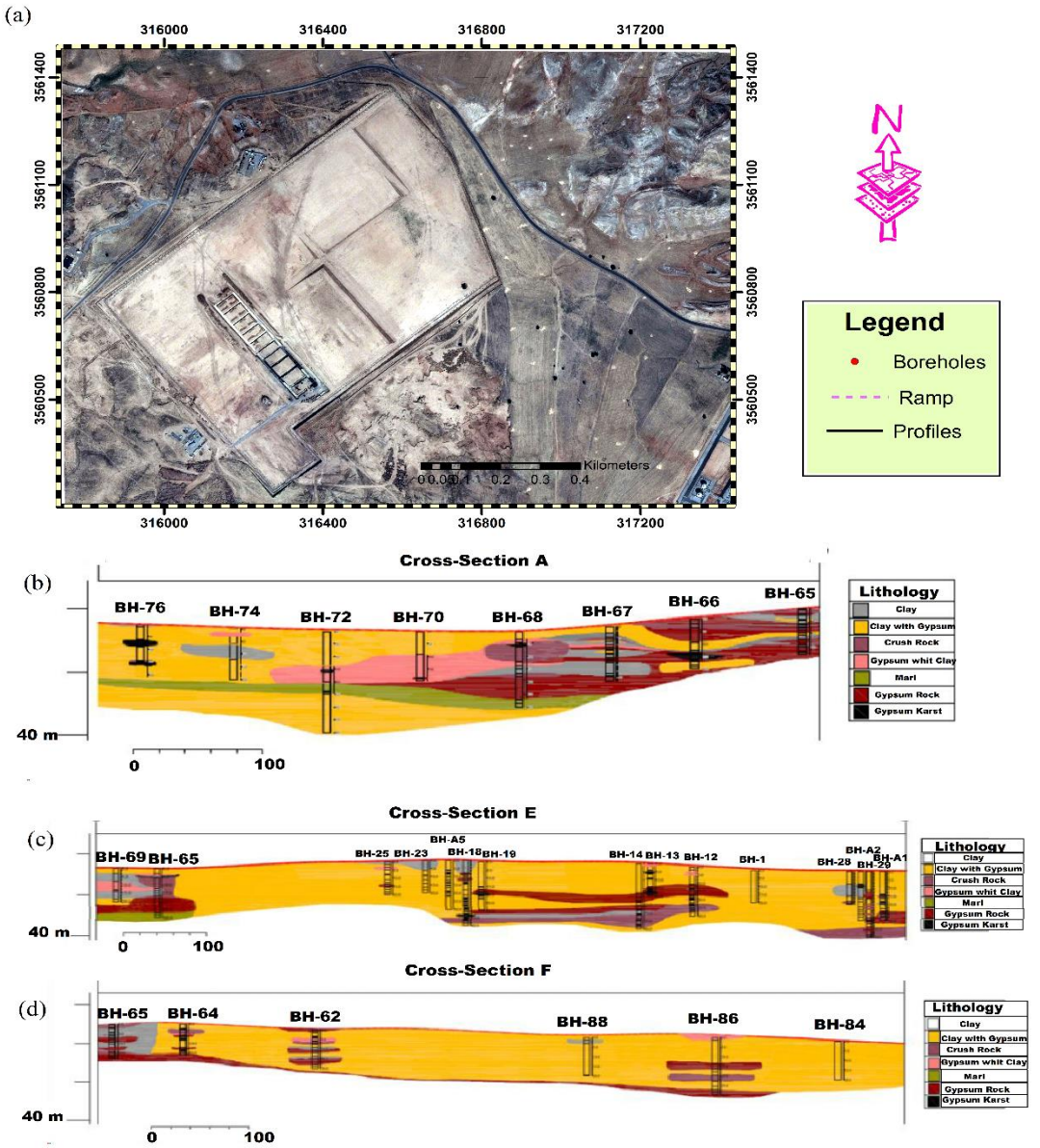
تجزیه‌وتحلیل داده‌های ژئوتکنیکی

انطباق کارست‌های گچی با پروفیل‌های زمین‌شناسی

جمع‌بندی اطلاعات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی محدوده موردمطالعه حاکی از وجود ۳۲ کارست گچی در اعماق ۳۶-۴ متری بوده که با بررسی موقعیت قرارگیری کارست‌های گچی در لایه‌های زمین‌شناسی زیرسطحی سایت پتروشیمی، به کمک انطباق گمانه‌های هم‌جوار چندین مقطع زمین‌شناسی به‌صورت طولی و عرضی مطابق شکل ۶-a در جهات مختلف محدوده موردمطالعه مطابق شکل‌های ۶-b,c,d ، مشخص گردید عمده کارست‌های گچی به‌موازات

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

مقطع E (شکل ۶- c)، یعنی قسمت مرکزی پتروشیمی مسجدسلیمان شکل یافته‌اند. در این پروفیل عمده مصالح در ۱۵ متر بالایی گمانه‌ها، خاک سیلت و رس گچ دار بوده و سنگ ژیپس در قسمت شرقی در اعماق و در قسمت غربی در سطح و عمق گمانه‌ها دیده می‌شود. درمجموع می‌توان گفت حفره‌های کم‌عمق مانند قسمت جنوبی (شکل ۶- d) محدوده موردمطالعه مربوط به انحلال خاک‌های گچی باشد و حفره‌های عمیق در سنگ‌های ژیپسی و انیدریتی احتمالاً به دلیل تماس جریان آب زیرزمینی تشکیل‌شده است.



شکل۶. a) بررسی موقعیت کارست‌های گچی در مقاطع زمین‌شناسی پتروشیمی مسجدسلیمان، b) مقطع A (در امتداد قسمت غربی سایت)، c) مقطع E (در امتداد قسمت مرکزی سایت) و d) پروفیل زمین‌شناسی مقطع F (در امتداد قسمت جنوبی سایت)

Fig. 6. a) Illustrates the distribution of gypsum karsts within the geological sections of the Masjed Soleyman Petrochemical Site, with specific details provided for sections A, E, and F, which correspond to the western b), central c) , and southern d) parts of the site, respectively.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

درواقع هر جا که لایه‌های گچ دار نزدیک سطح زمین قرارگرفته باشند احتمال حفره‌دار شدن و به دنبال آن ریزش بخش‌های رویی به داخل حفره‌ها بیشتر می‌شود. سازند گچساران به دلیل دارا بودن ماهیت شکل‌پذیری، تحت فازهای تکتونیکی به‌هم‌ریخته و تغییر شکل یافته است به‌طوری‌که در لایه‌های سخت‌تر موجب شکستگی و انقطاع، و در لایه‌های نرم‌تر و شکل‌پذیر باعث چین‌خوردگی محلی شده است. به همین دلیل این سازند را در ساختگاه نمی‌توان به‌صورت لایه مشخصی تعقیب نمود. علاوه بر این وجود گچ، انیدریت و نمک در این سازند که دارای پتانسیل انحلال و افزایش حجم می‌باشند، موجب به‌هم‌ریختگی بیشتر سنگ‌ها و انقطاع لایه‌ها و ایجاد عوارض کارستی به‌صورت فرو چاله‌ها، کانال‌های مدفون در طی زمان شده است.

انطباق کارست‌های گچی با شبکه آبراهه‌های سطحی

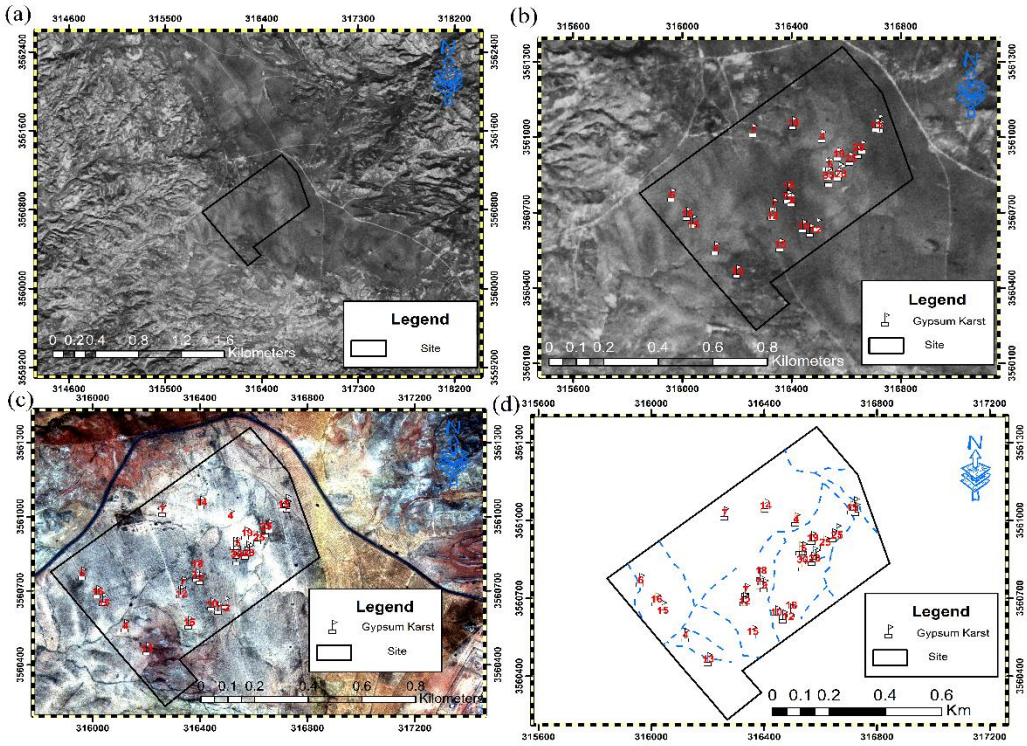
در شرایط فعلی ساختگاه موردنظر کاملاً تسطیح شده است ولی با دریافت و بررسی تصاویر ماهواره کرونا (Corona) مربوط به سال ۱۹۶۸ میلادی (بالغبر نیم‌قرن پیش) از محدوده مورد مطالعه می‌توان دریافت مجتمع سایت پتروشیمی دارای ارتفاع پایین‌تر از اراضی مجاور بوده به‌نحوی‌که رواناب سطحی اراضی بالادست و ارتفاعات در آن زهکشی می‌شده است (شکل ۷- a). و می‌توان الگوی ریزبافت، درختی و منفرد مجاری آب‌های سطحی را به دلیل رخنمون سازند گچساران در منطقه مشاهده کرد (شکل ۷- b). با بررسی تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث می‌توان دریافت تا سال ۲۰۱۱ میلادی الگوی زهکشی منطقه تفاوتی نداشته، تپه¬ماهورهای منطقه توسط خطوط تقسیم آب‌های سطحی جدا می‌شده است (شکل ۷- c). به‌طورکلی الگوی زهکشی رواناب سطحی در سایت پتروشیمی به‌صورت شمالی–جنوبی و شرقی-غربی بوده به‌نحوی‌که رواناب سطحی قسمت شمالی پس از پخش‌شدگی در مرکز و قسمت جنوبی سایت پتروشیمی تخلیه‌شده و قسمتی از رواناب سطحی نیز به حرکت با سمت غرب سایت از منطقه زهکشی می‌شده است (شکل ۷- d).

انطباق کارست‌های گچی با وضعیت آب زیرزمینی منطقه

جهت تهیه نقشه آب زیرزمینی منطقه، تعداد ۶۳ گمانه به نحوی انتخاب شد که در سراسر مساحت سایت پتروشیمی را پوشش داده و دارای توزیع مناسب باشند. سپس با استفاده از عمق‌یاب دارای سنسور الکتریکی سطح آب گمانه‌ها اندازه‌گیری گردید و با انتقال داده‌ها به محیط نرم‌افزارهای ArcGIS و Surfer نقشه تراز آب زیرزمینی به روش زمین‌آماری کریجینگ تهیه شد. نتایج حاکی از آن بود که جریان آب زیرزمینی در محدوده موردمطالعه نسبتاً پیچیده و سطح آب زیرزمینی در عمق متوسط ۱۰-۹ متر می‌باشد. همچنین با پیاده‌سازی کارست‌های گچی شناسایی‌شده، در اعماق مختلف، که موقعیت آن‌ها با عمق برخورد به کارست‌ها در شکل ۸ قابل‌مشاهده است. مشخص گردید که حفرات و کارست‌های گچی منطقه در اعماق ۳۶-۴ متری سطح زمین با عمق میانگین ۱۶ متری تشکیل‌شده‌اند که از مجموع ۳۲ حفره و کارست شناسایی‌شده تعداد ۲۳ مورد از آن‌ها با عمق میانگین ۱۹/۶ در زیر سطح آب زیرزمینی واقع‌شده‌اند و تعداد ۹ مورد از آن‌ها با عمق میانگین ۶/۵ متر بالای سطح آب زیرزمینی تشکیل‌شده‌اند. بنابراین با توجه به قرارگیری و تجمع بالغبر ۲۳ حفره کارستی در زیر تراز سطح آب زیرزمینی (Under Ground Water Level Contour, UGWLC) (شکل ۸- a) و تشکیل آن‌ها در محل تجمع جهت جریان آب زیرزمینی (Under Ground Water Flow Direction, UGWFD) (شکل ۸- b) نقش آب زیرزمینی و تغییرات آن در منطقه پررنگ‌ترین عامل در تشکیل کارست‌های گچی می‌باشد (جدول ۲).

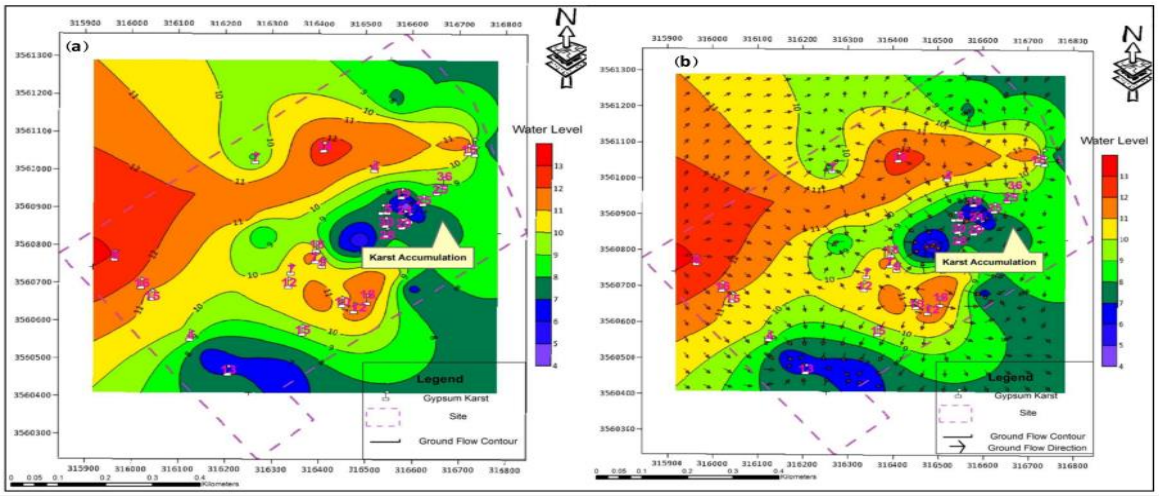
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]



شکل ۷. ارتباط کارست‌های گچی با منابع آب‌های سطحی محدوده موردمطالعه، a) رقومی سازی محدوده موردمطالعه بر عکس هوایی سال ۱۹۶۸ میلادی ماهواره کرونا، b) پیاده‌سازی گمانه‌های دارای کارست بر روی عکس هوایی سال ۱۹۶۸ میلادی ماهواره کرونا، c) پیاده‌سازی گمانه‌های دارای کارست بر روی تصویر گوگل ارث سال ۲۰۱۱ میلادی و d) ارتباط الگوی زهکشی آب سطحی با گمانه‌های دارای کارست

Fig. 6. The relationship between gypsum karsts and surface water in the study area, a) a digitized map of the study area based on a 1968 Corona satellite image, b) the location of karst boreholes on the 1968 Corona satellite image, c) the location of karst boreholes on a 2011 Google Earth image, and d) the connection between surface water drainage patterns and karst boreholes



شکل ۸. a) ارتباط کارست‌های گچی با تراز سطح آب زیرزمینی و b) قرارگیری محل تجمع کارست گچی در محدوده جهت جریان آب زیرزمینی

Fig. 8. a) Illustrates the connection between gypsum karst and groundwater levels and b) It also shows the location of gypsum karst accumulation within the direction of groundwater flow.

جدول ۲. موقعیت قرارگیری کارست‌های گچی شناسایی‌شده نسبت به سطح آب زیرزمینی

Table 2. Spatial Relationship between Identified Gypsum Karst Features and Groundwater Levels

Number	Coordinates		Depth (m)	The position of gypsum karst relative to the groundwater level
	X	Y		
1	316724	3561066	11	Down
2	316726	3561045	12	Down
3	316712	3561050	15	Down
4	316660	3560962	36	Down
5	316645	3560944	25	Down
6	316587	3560869	13	Down
7	316577	3560876	21	Down
8	316571	3560854	20	Down
9	316536	3560858	30	Down
10	316529	3560892	34	Down
11	316541	3560893	5	UP
12	316538	3560831	28	Down
13	316536	3560858	30	Down
14	316513	3561005	4	UP
15	316405	3561058	14	Down
16	316261	3561028	7	UP
17	316390	3560792	18	Down
18	316388	3560763	7	UP
19	316402	3560751	9	UP
20	316336	3560733	7	UP
21	316330	3560697	12	Down
22	316497	3560653	18	Down
23	316470	3560630	12	Down
24	316444	3560647	10	UP
25	316359	3560572	15	Down
26	316202	3560466	13	Down
27	316122	3560559	4	UP
28	316041	3560667	15	Down
29	316018	3560697	16	Down
30	315963	3560771	6	UP
31	316616	3560915	25	Down
32	316570	3560934	19	Down

درمجموع با کنار هم گذاشتن شبکه زهکشی آب سطحی، نقشه تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی، همچنین اطلاعات گمانه‌هایی که در حین مطالعات ژئوتکنیک با پدیده افت راد و وجود حفره مواجهه شدند می‌توان دریافت که در غرب و جنوب شرق ساختگاه که پوشیده از رس ضخیم است، حفرات نزدیک سطح زمین هستند و عمدتاً از نظر ابعاد کوچک‌اند و بالای سطح آب قرارگرفته‌اند و موقعیت گمانه‌های حفره‌دار، تطابق خوبی با الگوی زهکشی دارند. ازآنجاکه تشکیل این حفرات مربوط به نفوذ آب‌های سطحی به عمق و انحلال گچ در خاک بوده بنابراین انتظار می‌رود حفره‌های دیگری در

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

اطراف مسیر آب وجود داشته باشد. در شمال و شمال شرق سایت پروژه برخی از حفره‌ها در بالای سطح آب تشکیل‌شده و برخی دیگر در عمق بیش از ۲۰-۳۰ متر وجود دارند. به نظر می‌رسد حفره‌های کم‌عمق مانند قسمت جنوبی مربوط به انحلال خاک‌های گچی باشد و حفره‌های عمیق در سنگ خردشده و گچها به دلیل تماس جریان آب زیرزمینی تشکیل‌شده است.

انطباق کارست‌های گچی با نتایج آزمایش نفوذ استاندارد گمانه‌ها (مقادیر SPT)

اگرچه تعداد، عمق، توزیع و تراکم گمانه‌ها در سایت پتروشیمی، به‌خصوص در نواحی مورد پیش‌بینی جهت قرارگیری سازه‌های حساس، به‌گونه‌ای طراحی و برنامه‌ریزی گردید تا بتوان کارست‌های گچی و لایه‌های ضعیف زیرسطحی را پوشش داد ولی زمین‌شناسی ساختاری، سازند گچساران در محدوده مورد مطالعه بسیار پیچیده بوده و از الگوی مشخصی تبعیت نمی‌کرد (شکل ۹). همچنین ازآنجاکه کارست‌ها دارای اشکال فضایی پیچیده؛ غیریکنواخت و نامنظم بودند. بنابراین به‌منظور اعتبارسنجی و بررسی صحت کارست‌های گچی شناسایی‌شده در محدوده پتروشیمی، همخوانی نتایج با کمک نرم‌افزار ArcGIS با، ۱- نقشه‌های پهنه‌بندی SPT، ۲- نقشه‌های پهنه‌بندی لیتولوژی مصالح زیرسطحی و ۳-مقادیر SPT گمانه‌های کارست دار (با لیتولوژی خاک سیلت و رس گچدار و عمق بالای سطح ایستابی) مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا، در گام اول، با توجه به تشکیل کارست‌های گچی در بالا و پایین سطح آب زیرزمینی در منطقه ناشی از فرایندهای آبشویی، نفوذ و تغییرات سطح آب زیرزمینی و همچنین انجام آزمایش نفوذ استاندارد در فواصل ۱/۵ متری در گمانه‌ها، نقشه‌های پهنه‌بندی مقادیر SPT در اعماق ۴/۵ متر (شکل ۱۰- a)، ۱۰/۵ متر (شکل ۱۰- b) و ۱۵ متر (شکل ۱۰- e) به ترتیب به‌عنوان نماینده‌های تراز بالای سطح آب زیرزمینی، تراز سطح ایستابی و تراز زیر سطح آب زیرزمینی ترسیم شدند. سپس در گام دوم، جهت شناسایی موقعیت و گستردگی هر یک از مصالح که آزمون SPT بر روی آن صورت گرفته نقشه‌های پهنه‌بندی لیتولوژی مصالح نیز در اعماق ۴/۵ متر (شکل ۱۰- c) و ۱۰/۵ متر (شکل ۱۰-d) به همراه نقشه پهنه‌بندی سنگ‌بستر (شکل ۱۰-f) سایت پتروشیمی تعیین و ارائه شدند و درنهایت در گام سوم موقعیت کارست‌های گچی شناسایی‌شده با برچسب عمق برخورد به آن‌ها بر روی نقشه‌ها جهت اعتبارسنجی پیاده‌سازی شد.



شکل ۹. لایه‌بندی پیچیده به همراه جنس متنوع مصالح در ترانشه مجاور سایت پتروشیمی مسجدسلیمان
Fig 9. The trench near the Masjed Soleyman petrochemical site with features complex layering and varied lithology.

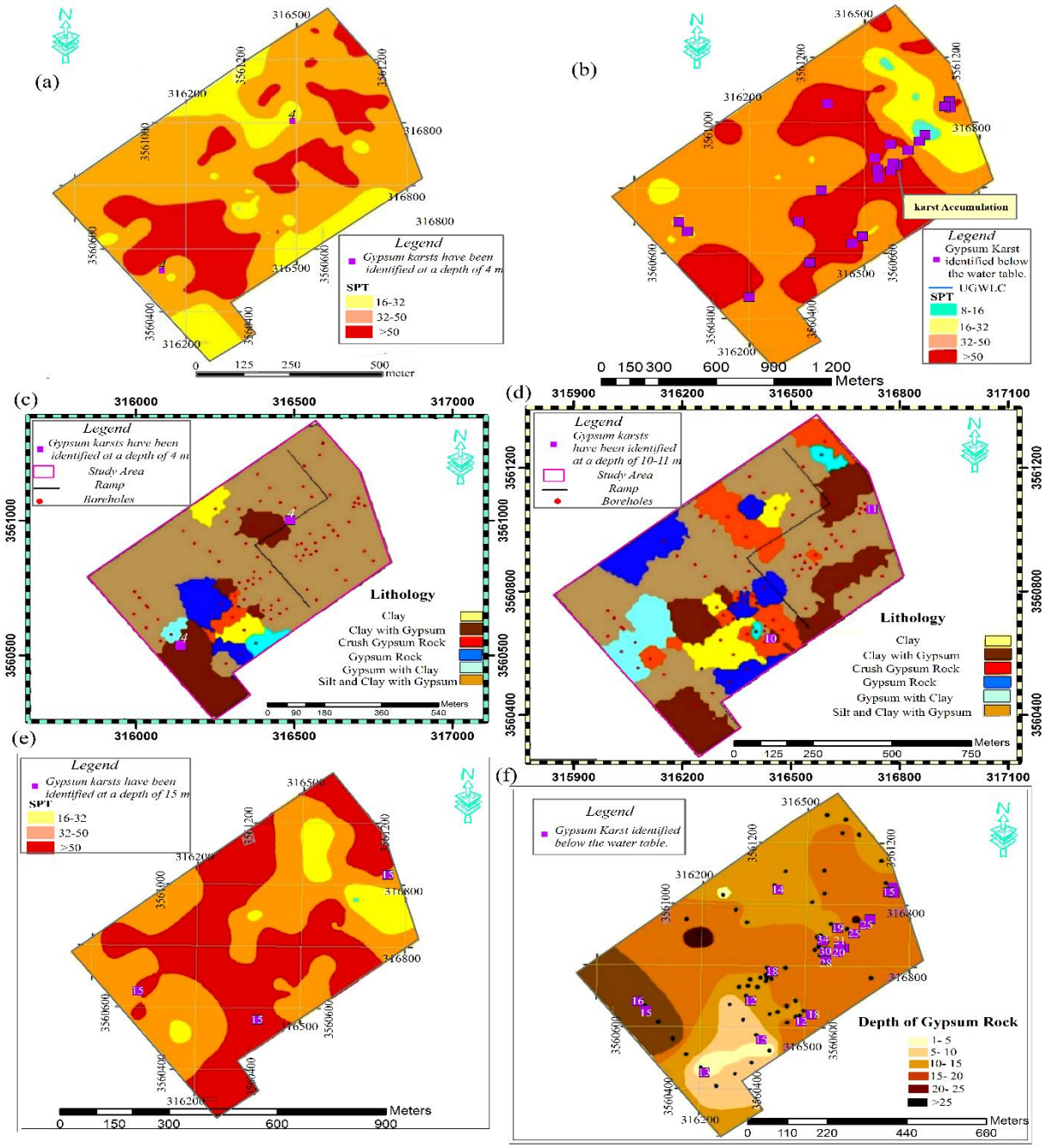
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

نتایج حاکی از آن بود که خاک‌های ریزدانه سازند گچساران در حالت خشک (بالای سطح ایستابی) عموماً دارای مقادیر SPT بیش از ۳۰ می‌باشند که نشان‌دهنده سختی بالای آن‌ها می‌باشد. به‌نحوی‌که اگرچه کارست‌های گچی شناسایی‌شده در عمق ۴ متری با توجه به مقادیر SPT و نقشه لیتولوژی زیرسطحی در لایه‌های سفت‌وسخت (سیلت و رس گچ‌دار) ناشی از فرایندهای انحلال و آبشویی گچ، در زمان نفوذ آب شکل‌گرفته‌اند ولی بااین‌وجود مقادیر SPT در آن موقعیت نسبت به مناطق هم‌جوار متغیر و عموماً کمتر است (شکل‌های ۱۰- c,a). در ادامه مقاومت لایه‌های گچی در اثر تغییرات در میزان رطوبت، تحت تأثیر قرار می‌گیرد. چنانچه با پیاده‌سازی ترازهای سطح آب زیرزمینی بر روی نقشه پهنه‌بندی SPT در عمق ۱۰/۵ متر می‌توان دریافت در نواحی با سطح آب بالاتر، همچون قسمت شرقی پتروشیمی (نواحی سبز و زردرنگ) مقاومت لایه‌های خاک سیلت و رس گچ دار سازند گچساران، پایین‌تر از سایر نواحی با لیتولوژی سنگ ژیپس می‌باشد به‌بیان‌دیگر حضور مصالح سنگ ژیپس و انیدریت منجر به ثبت ارقام بالای SPT شده است (شکل‌های۱۰-d,b). چنانچه پیاده‌سازی دو حفره شناسایی‌شده به ترتیب در ترازهای ۱۰ و ۱۱ متر بر روی نقشه لیتولوژی آن عمق (شکل ۱۰-d) حاکی از قرارگیری آن‌ها در میان لایه‌های سنگ ژیپس خردشده و لایه سیلت و رس سازند گچساران ناشی از تغییرات سطح ایستابی می‌باشد. همچنین پیاده‌سازی سه مورد کارست‌های گچی شناسایی‌شده در عمق ۱۵ متر (زیر سطح ایستایی) بر روی نقشه پهنه‌بندی مقادیر SPT در این عمق حاکی از شکل‌گیری کارست‌های گچی در میان لایه‌های سنگ ژیپس سازند گچساران ناشی از انحلال ژیپس در اثر جریان آب زیرزمینی می‌باشد (شکل ۱۰-e).

درمجموع با پیاده‌سازی موقعیت کارست‌های گچی شناسایی‌شده در زیر تراز سطح ایستابی بر روی نقشه مقادیر SPT در عمق ۱۰/۵ متر (تراز نماینده سطح ایستابی) (شکل ۱۰-b) و نقشه پهنه‌بندی سنگ‌بستر (شکل ۱۰-f) می‌توان دریافت با افزایش عمق از میزان گستردگی لیتولوژی سیلت و رس گچ دار کاسته می‌شود و جای خود را به سنگ ژیپس سازند گچساران می‌دهد بنابراین مجموع عدد SPT با عمق افزایش می‌یابد. چنانچه عمق سنگ‌بستر در جنوب غربی سایت کمتر از ۱۰ متر، در شمال غربی بالای ۲۰ متر و در مرکز سایت بین ۲۰ تا ۱۰ متر می‌باشد. بنابراین با توجه به اثرگذاری حضور آب زیرزمینی بر نتایج SPT و شکل‌گیری عمده کارست‌های گچی در زیر سطح ایستابی در میان مصالح سنگ ژیپس، می‌توان مجدد حضور آب زیرزمینی و جهت جریان آن را عامل اصلی تشکیل کارست‌های گچی در منطقه دانست.

درنهایت با توجه به اینکه آزمایش نفوذ استاندارد بر روی خاک صورت می‌گیرد و نتایج آن برای مصالح سنگی قابل‌اعتماد نمی‌باشد و اعداد SPT در حضور آب و فشار منفذی نیاز تصحیح دارند. بنابراین مطابق شکل ۱۱، تغییرات عدد نفوذ SPT، تا عمق ۱۰/۵ متر نسبت به عمق در گمانه‌های کارست‌دار مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید وجود میان‌لایه‌ها و لایه‌هایی با مقاومت پایین و کارست‌های گچی، منجر به کاهش مقاومت (شیب منفی مقادیر SPT) لایه‌های زیرسطحی نسبت به عمق شده است (شکل ۱۱).

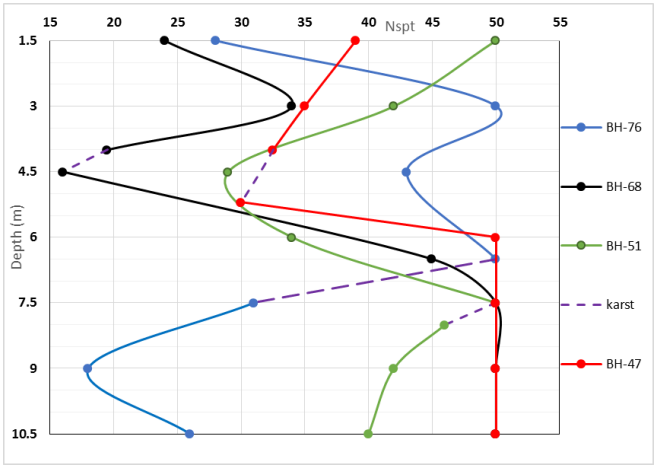
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]



شکل ۱۰. رقومی‌سازی کارست‌های گچی شناسایی‌شده، a) در عمق ۴ متری بر روی نقشه پهنه‌بندی مقادیر SPT در عمق ۴/۵ متر، b) زیر سطح ایستابی بر روی نقشه پهنه‌بندی مقادیر SPT در عمق ۱۰/۵ متر، c) در عمق ۴ متری بر روی نقشه پهنه‌بندی لیتولوژی مصالح در عمق ۴/۵ متری، d) در اعماق ۱۱-۱۰ متری بر روی نقشه پهنه‌بندی لیتولوژی مصالح در عمق ۱۰/۵ متری، e) در عمق ۱۵ متری بر روی نقشه پهنه‌بندی مقادیر SPT در عمق ۱۵ متر و f) در زیر سطح ایستابی بر روی نقشه پهنه‌بندی سنگ‌بستر محدوده موردمطالعه

Fig. 10. Digitization of gypsum karsts identified, a) at a depth of 4 meters on the SPT zoning map at a depth of 4.5 meters, b) below the water table on the SPT zoning map at a depth of 10.5 m, c) at a depth of 4 meters on a lithology zoning map of materials at a depth of 4.5 meters, d) at depths of 10-11 meters on a lithology zoning map of materials at a depth of 10.5 meters, e) at a depth of 15 meters on the zoning map of SPT values at a depth of 15 meters, and f) below the water table on the bedrock zoning map of the study area.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]



شکل ۱۱. تغییرات عدد نفوذ SPT نسبت به عمق در گمانه‌های کارست‌دار

Fig. 11. Variations in the SPT penetration number with depth in karst boreholes.

آنالیز شیمیایی آب زیرزمینی منطقه

با توجه به نقش فعال آب‌های زیرزمینی در منطقه به دلیل امکان شسته شدن املاح گچ و انتقال آن به آب زیرزمینی تحت تأثیر افزایش سهم آب تغذیه‌ای با رخداد بارندگی در فصل‌تر و همچنین احتمال افزایش غلظت املاح محلول یون سولفات در فصل خشک به دلایل کاهش بارش و غالب بودن تبخیر در منطقه، از ۵ گمانه مختلف به شرح جدول ۳ در پایان دوره بارندگی (فصل بهار (اوایل خردادماه))، نمونه‌برداری گردید و مقادیر اسیدیته، سختی، کلسیم، منیزیم، کلرید، سولفات، پتاسیم و آمونیاک آب مورد اندازه‌گیری قرار گرفت که نتایج حاکی از محتوای بالای سولفات در آب زیرزمینی به دلیل انحلال و کارستی شدن سازند گچساران بود. هرچند پیشنهاد می‌گردد مطالعات آب زیرزمینی در گمانه‌ها جهت ارزیابی تأثیر الگوهای بارش بر رژیم هیدرولیکی، نوسانات سطح سفره آب زیرزمینی و همچنین هیدروشیمی آب در منطقه به دلیل وجود مواد انحلال‌پذیر در سازند گچساران به‌صورت کامل مورد مطالعه قرار گیرد.

جدول ۳. آنالیز شیمیایی آب زیرزمینی محدوده موردمطالعه

Table 3. Chemical analysis of groundwater in the study area

Test	Results					Average
	BH-32	BH-40	BH-65	BH-74	BH-86	
Coordinate (U.T.M)	X: 316399 Y:3560642	X: 316555 Y:3561290	X: 316250 Y:3560408	X: 315998 Y:3560720	X: 316690 Y:3560762	–
Depth of water table in boreholes (m)	11.3	8	7.7	12.3	9	9.66
PH	6.63	6.78	6.88	6.8	6.96	6.81
Total Hardness (ppm Caco3)	2340	2080	1820	2560	2480	2256
Calcium (ppm)	640	584	640	584	576	604.8
Magnesium (ppm)	177.6	148.8	52.8	264	249.6	178.56
Chloride (ppm)	475	50	52	325	26	185.6
Sulfate (ppm)	1500	1300	1200	1650	1750	1480
Potassium (ppm)	8	5	5	7	7	6.4
Ammonia (ppm)	0.24	0.3	0.46	0	0	0.2

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

همچنین با توجه به میانگین مقدار سولفات آب زیرزمینی (مقدار ppm ۱۴۸۰) بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران (ABA) ، شرایط محیطی از نظر هجوم سولفات متوسط (XS1) تا شدید (XS2) می‌باشد در این خصوص آیین‌نامه مذکور پیشنهاد می‌کند اگر کل ساختمان بالاتر از سفره آب قرار گیرد، از سیمان نوع I (میزان سیمان باید بیشتر از $۳۵۰Kg/m^3$ و نسبت آب به سیمان باید کمتر از ۰/۵ باشد) یا سیمان نوع V (میزان سیمان باید بیشتر از $۳۴۰ Kg/m^3$ و نسبت محتوای آب به سیمان باید کمتر از ۰/۵ باشد) استفاده گردد. بعلاوه بر اساس استاندارد طراحی بتن که حداکثر مقدار کلرید مجاز را برای غلظت تهاجمی (ppm) ۵۰۰ و مقدار pH را ۸/۵ – ۵ بیان می‌کند، مقادیر کلرید و اسیدیته آب در محدوده مجاز واقع‌شده‌اند و همچنین مطابق STN EN206-1 در جه تهاجم آمونیاک و منیزیم، در سایت مورد بررسی ضعیف است.

نتایج

در این پژوهش کارست‌های گچی زیرسطحی مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان با استفاده از تلفیق روش رادار نفوذی زمین (GPR) که یکی از روش‌های ژئوفیزیکی غیر مخرب باقدرت تفکیک زیاد است که از بازتاب امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا برای آشکارسازی زیر سطح زمین استفاده می‌کند و روش ژئوتکنیکی مخرب یعنی حفر بالغبر ۱۱۳ گمانه مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن بود که آنتن ۲۵۰ مگاهرتز وضوح بهتری (تا عمق حداکثر ۵ متری) ارائه می‌دهند درحالی‌که فرکانس (۵۰ مگاهرتز) عمق نفوذ بیشتری (حداکثر ۱۰ متری) را به قیمت کاهش وضوح در نگاشت راداری ارائه می‌دهند. زیرا در عمق‌های پایین‌تر محدودیت‌های موجود در منطقه همچون وجود سطح ایستابی نفوذ سیگنال را تضعیف می‌کند.

درمجموع اگرچه روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل هزینه کمتر و زمان صرف شده کوتاه‌تر نسبت به روش‌های ژئوتکنیکی مانند حفاری و بررسی مصالح زیرسطحی کاربرد روزافزونی یافته است ولی این روش‌ها نیز نسبت به عمق محدود بوده و تفسیر آن‌ها گاهاً مشکل می‌باشد. ازآنجاکه هر روش مزایا و معایب ویژه خود را دارد و هیچ روش واحدی در این خصوص به‌طور جهانی کامل نیست، بنابراین ضروری است با تلفیق نتایج نقاط ضعف روش‌های شناسایی را پوشش داد و بدین نحو به‌طور قابل‌توجهی دقت تشخیص کارست گچی زیرسطحی را افزایش داد. چنانچه بر مبنای این پژوهش بهترین روش درجه اول استفاده از نقشه‌های پایه همچون مجاری آب سطحی و زیرزمینی، توپوگرافی و شیب و غیره و سپس استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی کارست‌های گچی می‌باشد تا بتوان بر اساس آن‌ها و درجه اهمیت پروژه، حفاری‌های ژئوتکنیکی را متمرکز، هدفمند و مدیریت اقتصادی کرد. درنهایت نیز بتوان نقشه‌های آسیب‌پذیری و خطر کارست‌های گچی برای ارزیابی مشکلات کارست‌های گچی در منطقه ترسیم کرد.

همچنین نتایج این پژوهش نشان داد که مقاطع عمقی GPR می‌توانند نوع، بافت و عمق رسوبات سازند گچساران را توصیف کنند. چنانچه در اعماق زمین به‌خصوص تا عمق حدود ۱۰ متری آثار حفرات زیرسطحی که در اصطلاح ژئوفیزیکی به آن میرایی سیگنال می‌گویند در پروفیل‌ها به‌صورت هذلولی شکل قابل‌مشاهده است بعلاوه انطباق کارست‌های گچی با پروفیل‌های زمین‌شناسی حاکی از آن بوده عمده کارست‌های گچی به‌موازات قسمت مرکزی پتروشیمی مسجدسلیمان شکل یافته‌اند. در این پروفیل عمده مصالح در ۱۵ متر بالایی گمانه‌ها، خاک سیلت و رس گچ دار بوده و سنگ ژیپس در قسمت شرقی در اعماق و در قسمت غربی در سطح و عمق گمانه‌ها دیده می‌شود. با کنار هم گذاشتن شبکه زهکشی آب سطحی، نقشه تراز سطح ایستابی آب زیرزمینی، همچنین اطلاعات گمانه‌هایی که در حین مطالعات ژئوتکنیک با پدیده افت راد و وجود حفره

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

مواجهه شدند می‌توان دریافت که در غرب و جنوب شرق ساختگاه که پوشیده از رس ضخیم است، حفرات نزدیک سطح زمین هستند و عمدتاً از نظر ابعاد کوچک‌اند و بالای سطح آب قرارگرفته‌اند و موقعیت گمانه‌های حفره‌دار، تطابق خوبی با الگوی زهکشی دارند. ازآنجاکه تشکیل این حفرات مربوط به نفوذ آب‌های سطحی به عمق و انحلال گچ در خاک بوده بنابراین انتظار می‌رود حفره‌های دیگری در اطراف مسیر آب وجود داشته باشد. در شمال و شمال شرق سایت پروژه برخی از حفره‌ها در بالای سطح آب تشکیل‌شده و برخی دیگر در عمق بیش از ۲۰-۳۰ متر وجود دارند. به نظر می‌رسد حفره‌های کم‌عمق مانند قسمت جنوبی مربوط به انحلال خاک‌های گچی باشد و حفره‌های عمیق در سنگ خردشده و گچ‌ها به دلیل تماس جریان آب زیرزمینی تشکیل‌شده است. علاوه بر این انطباق کارست‌های گچی شناسایی‌شده با نقشه‌های پهنه‌بندی SPT، نقشه‌های پهنه‌بندی لیتولوژی مصالح زیرسطحی و مقادیر SPT گمانه‌های کارست‌دار (با لیتولوژی خاک سیلت و رس گچ‌دار و عمق بالای سطح ایستابی) نشان داد که کارست‌های گچی شناسایی شده از اعتبار و صحت خوبی برخوردار بوده به نحوی که منجر به کاهش مقاومت لایه‌های خاک در اعماق مختلف در برابر ضربات SPT شده‌اند. درنهایت با توجه وضعیت زمین‌شناسی منطقه و نتایج حاصل از این پژوهش پیشگیری از خطر کارست‌های گچی در منطقه مستلزم دو اقدام کلیدی است: اول تراکم لایه سطحی زمین در محدوده موردمطالعه جهت پیشگیری از نفوذ آب، انحلال و آبشویی و دوم استفاده از بتن‌های دارای مقاومت مناسب و دارای نفوذپذیری کم و تا حد امکان فاقد مواد آسیب‌پذیر، همچون سیمان پرآلومین، سیمان‌های پرتلند یا سیمان‌های پرتلند آمیخته با پوزولان‌های طبیعی یا مصنوعی، با توجه به آزمون‌های شیمی آب و هجوم سولفات شدید.

همچنین ضروری است کارست‌های گچی شناسایی‌شده با تزریق ملات، غیر واگرا، ضد شسته شدن و دارای قابلیت گیرش سریع و کم‌تحرک در لایه‌های زیرسطحی تثبیت گردند، این نوع ملات که به ملات خشک ویسکوزیته بالا گفته می‌شود با خاک ترکیب نمی‌شوند و نفوذپذیری آن را تغییر نمی‌دهند و یا باعث شکستگی نمی‌شوند. در عوض، فضاهای خالی بالقوه را مسدود و خاک سست را فشرده و جامد می‌کنند و بدین نحو توده‌های متمرکزی را تشکیل می‌دهند که کمترین تعامل را با محیط اطراف دارند و پس از تنظیم بی‌اثر می‌مانند که این عمل، آن‌ها را به گزینه‌ای پایدار تبدیل می‌کند. بنابراین ضمن آب‌بندی مؤثر سازندهای نفوذپذیر آب با مقاومت بالا، خواص توده سنگ بهبود می‌یابد. در این خصوص، فشار تزریق باید بر اساس عوامل خاص محل مانند مقاومت سنگ ژیپس، ویژگی‌های شکستگی‌ها و کارست‌ها و شرایط زمین‌شناسی محلی به نحوی تعیین گردد که منجر به توسعه کارست و شکستگی‌ها نگردد و اثربخشی تزریق را کاهش دهد که این امر مستلزم انجام محاسبات دقیق جهت تعیین مناسب‌ترین فشار تزریق می‌باشد.

درمجموع می‌توان گفت شناسایی، بررسی و درمان کارست‌های گچی موضوعی جذاب، درعین‌حال پیچیده و بین‌رشته‌ای (ژئوفیزیک، زمین‌شناسی مهندسی، آب زیرزمینی، جغرافیا و عمران) بوده و بنابراین، مطالعه آن نیازمند یک نگاه جامع همراه با نوآوری و خلاقیت می‌باشد تا درنهایت بتوان جهت حل مسئله و رفع معضل کارست‌های گچی به یک طرح نهایی مدرن، انعطاف‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست (با در نظر گرفتن تغییرات پارامترهای هیدروژئولوژیکی آبخوان در بلندمدت) دست‌یافت.

تشکر و قدردانی

در پایان از دانشگاه تربیت مدرس و گروه ژئوفیزیک شرکت زمین فیزیک پویا که امکان انجام این پژوهش را فراهم آورده و ما را در انجام آن یاری نموده تشکر و قدردانی می‌گردد.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

References

Abbaspour, S., Daavi, H., & Feli, J. (2008). Operational method of constructed canals of irrigation and dranage network in gypsum soils. In 1 Th National Seminar of Geotechnical Problems of Irrigation and Drainage Networks. (In Persian)

Ahmad, S. M., Wang, T., Khan, S., Azeem, M. W., & Fu, L. (2025). Rapid karstification process with evaporite-driven sinkholes in Southern Kohat Basin, NW Pakistan. Npj Natural Hazards, 2 (1), 11.

Ahmadi, R., & Fathianpoor, N. (2016). Geotechnical investigation of 33 pole bridge structure in Isfahan using Ground- Penetrating Radar method. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology. 9 (1 & 2), 85-102. (In Persian)

Al-Khersan, E. H., Hijab, B. R., & Al-Khazali, I. A. (2021). Integrated ground penetrating radar and electrical resistivity study to explore such Basrah low resistivity soils for engineering purposes, Southern Iraq. The Iraqi Geological Journal, 54(2E), 104-121.

Al-Saoudi, N. K., Al-Khafaji, A. N., & Al-Mosawi, M. J. (2013). Challenging problems of gypseous soils in Iraq. In Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Pp, 479-482. Paris: Presses des Ponts.

Amanatidou, E., Vargemezis, G., & Tsourlos, P. (2022). Combined application of seismic and electrical geophysical methods for karst cavities detection: A case study at the campus of the new University of Western Macedonia, Kozani, Greece. Journal of Applied Geophysics, 196, 104499.

Amin, P., Akhavan Ghalibaf, M., Ruhi Mermut, A., & Delavarkhalafi, A. (2023). Investigating and processing of ground penetrating radar (GPR) sections in order to identify high-risk areas of subsidence and sinkholes in the alluvial sedimentary plain of Abarkooh, Yazd. Iranian Journal of Geophysics. 17(2), 127-138. (In Persian)

Amiri Bakhtiar, H., & Noorani Nejad, K. (2014). Revision of Zagros Stratigraphy: Gachsaran Formations, journal of Exploration & Production Oil & Gas. 111, 40-45. (In Persian)

Annan, A. P., & Cosway, S. W. (1994). GPR frequency selection. In Fifth International Conferention on Ground Penetrating Radar (pp. cp-300). European Association of Geoscientists & Engineers.

ASTM D1067-16. (2025). Standard Test Methods for Acidity or Alkalinity of Water, American Society for Testing and Materials

ASTM D1126-17. (2025). Standard Test Method for Hardness in Water, American Society for Testing and Materials

ASTM D1426-15. (2021)., Standard Test Methods for Ammonia Nitrogen in Water, American Society for Testing and Materials

ASTM D3561-16. (2021). Standard Test Method for Lithium, Potassium, and Sodium Ions in Brackish Water, Seawater, and Brines by Atomic Absorption Spectrophotometry, American Society for Testing and Materials

ASTM D511-14. (2021). Standard Test Methods for Calcium and Magnesium in Water, American Society for Testing and Materials

ASTM D512-23. (2023). Standard Test Methods for Chloride Ion in Water, American Society for Testing and Materials.

ASTM D516-16. (2016). Standard Test Method for Sulfate Ion in Water, American Society for Testing and Materials

Baghdardokht, Z. (2005). Study of the solubility of karst formations at the construction site of Tang Shemiran Dam, Ilam, Master's thesis in Engineering Geology, Bo Ali Sina University, Hamadan. (In Persian)

Barba, L., Blancas, J., Ortiz, A., & Ligorred, J. (2009). GPR detection of karst and archaeological targets below the historical centre of Merida, Yucatán, Mexico. Studia Universitatis Babeş-Bolyai, Geologia, 54 (2), 27-31

Bazargan, J., & Moazzami, A. (2021). Comparison of constant dissolution coefficient of gypsum and anhydrite materials in surface flows using the results of laboratory models. Journal of Structural and Construction Engineering, 8(8). 144-154. (In Persian)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

Brune, G. (1965). Anhydrite and gypsum problems in engineering geology. Engineering Geology, 2(1), 26-38.

Cailleux, J., & Toulemont, M. (1982). La reconnaissance des cavites souterraines par methodes diagraphiques. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 26 (1), 33-42.

Caselle, C., Bonetto, S., Comina, C., & Stocco, S. (2020). GPR surveys for the prevention of karst risk in underground gypsum quarries. Tunnelling and Underground Space Technology, 95, 103-137.

Cist, D., & Schutz, A. (2005). A Low-Cost GPR Gas Pipe & Leak Detector. Geophysical Survey Systems, Inc. (US).

Cooper, A. H., & Gutiérrez, F. (2013). Dealing with gypsum karst problems: hazards, environmental issues, and planning, In book: Treatise on Geomorphology Volume 6: Karst Geomorphology,Pp, 451-462. Elsevier.

Dafalla, M., & Alfouzan, F. (2023). Electrical resistivity tomography of a gypsiferous subsurface soil: Geotechnical detection of a geoenvironmental phenomenon. Journal of King Saud University-Science, 35(4), 102-595.

Descloitres, M., Guérin, R., Ramirez, E., Gallairet, R., Ribstein, P., & Valla, F. (1999). Détermination de l'épaisseur des glaciers de Sarenne (Alpes) et de Chacaltaya (Bolivie) par prospection radar au sol à 50 MHz. La Houille Blanche, 85(5), 29-33.

Dreybrodt, W. (2004). Erosion Rates: Theoretical Models. In: Gunn J (ed.) Encyclopedia of Caves and Karst Science. Pp, 323-325. New York: Fitzroy.

Entezari, M., Gholamhaydari, H. & Karimi, H. (2022). Evaluation of growth in gypsum sinkholes and resulting hazards. Journal of Geography and Planning. 26(80), 43-27. (In Persian)

Estrada-Medina, H., Tuttle, W., Graham, R. C., Allen, M. F., & Jiménez-Osornio, J. J. (2010). Identification of underground karst features using ground-penetrating radar in Northern Yucatán, México. Vadose Zone Journal, 9(3), 653-661.

Eyuboglu, S., Mahdi, H., Al-Shukri, H., & Rock, L. (2003). Detection of water leaks using ground penetrating radar. In Proceedings of the Third International Conference on Applied Geophysics, Pp, 8-12. Orlando-FL.

Fakhri, B., Sadr Karimi, J., & Kiyani, M. (2008). Gypsum dissolution effects on the performance of a large dam. International Journal of Engineering, 21(2), 143-150.

Fenning, P. J., & Hasan, S. (1995). Pipeline route investigations using geophysical techniques. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 10(1), 229-235.

Ford, D., Williams, P. D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology. John Wiley & Sons.

Galve, J. P., Gutiérrez, F., Lucha, P., Bonachea, J., Remondo, J., Cendrero, A., & Sánchez, J. A. (2009). Sinkholes in the salt-bearing evaporite karst of the Ebro River valley upstream of Zaragoza city (NE Spain): geomorphological mapping and analysis as a basis for risk management. Geomorphology, 108(3-4), 145-158.

Ghazali, R., Rasam, A. R. A., Razali, M. H., Razali, R., & Latif, Z. A. (2019). Estimation of different subsurface materials depth using Ground Penetrating Radar. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, 8(1.3), 363-370.

Ghobadi, M. H., & Mousavi, S. (2007). Gypsum solubility and its role in dam sealing operations, 3rd Iranian Rock Mechanics Conference. (In Persian)

Giannopoulos, A. (2005). Modelling ground penetrating radar by GprMax. Construction and building materials, 19(10), 755-762.

Gołębiowski, T., & Jarosińska, E. (2019). Application of GPR and ERT methods for recognizing of gypsum deposits in urban areas. Acta Geophysica, 67(6), 2015-2030.

Gracia, A., Torrijo, F. J., Garzón-Roca, J., & Pérez-Picallo, M. (2024). Identification and Mitigation of Subsidence in Karstic Areas with Sustainable Geotechnical Structures: A Case Study in Gallur (Spain). Sustainability, 16(9), 36-43.

Guo, S., Yan, C., Yu, L., Liu, Y., Zhou, Y., & Shi, X. (2020). Characteristics, controlling factors, and formation of shallow buried karst in Eastern China: A case study in the Wuxi metro areas, Jiangsu Province. Environmental & Engineering Geoscience, 26(2), 257-269.

Gutierrez, F., & Cooper, A. H. (2013). Surface morphology of gypsum karst, Treatise on

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

Geomorphology, Academic Press, SanDiego, CA, Karst, Geomorphology, 6, 425-437.

Gutierrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Ortı, F., Duran, J.J., & Garay, P. (2008b). Geological and environmental implications of evaporite karst in Spain, Environmental Geology, 53, 951–965.

Gutierrez, F., Cooper, A. h., & Johnson, K. S. (2008-a). Identification, prediction, and mitigation of sinkhole hazards in evaporate karst areas. Environmental Geology 53, 1007-1022.

Gutiérrez, F., Galve, J. P., Guerrero, J., Lucha, P., Cendrero, A., Remondo, J., & Sánchez, J. A. (2007). The origin, typology, spatial distribution and detrimental effects of the sinkholes developed in the alluvial evaporite karst of the Ebro River valley downstream of Zaragoza city (NE Spain). Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group, 32(6), 912-928.

Gutierrez, F., Guerrero, J., & Lucha, P. (2008c). A genetic classification of sinkholes illustrated from evaporite paleokarst exposures in Spain, Environmental Geology, 53, 993–1006.

Hager, J., & Carnevale, M. (2006). The Application of Low Frequency GPR to Stratigraphic In-vestigations. In Proceedings of the 11th International Conference on Ground Penetrating Radar. HagerGeoScience, Inc.

Hashemifard, A, Kordvani, P, & Asadian, F. (2018). Study of the change in the form of the Gachsaran Formation in the area of the Upper Gotvand Dam using radar remote sensing data, Quarterly Journal of Physical Geography. 11(40), 49-62. (In Persian)

Hendrickx, J. M., Hong, S. H., Miller, T., Borchers, B., & Rhebergen, J. B. (2003). Soil effects on GPR detection of buried non-metallic mines. In Ground Penetrating Radar in sediments, 211, 191-198. Geological Society, London.

Herman, H. (1997). Robotic Subsurface Mapping Using Ground Penetrating Radar.PhD dissertation. Carnegie Mellon University.

James, A. N. (1992). Soluble material in civil engineering. Ellis Horwood Ltd, England, 433p.

Jassim, S. Z., Jibril, A. S., & Numan, N. M. (1997). Gypsum karstification in the middle Miocene Fatha Formation, Mosul area, northern Iraq. Geomorphology, 18(2), 137-149.

Jeannin, M., Garambois, S., Grégoire, C., & Jongmans, D. (2006). Multiconfiguration GPR measurements for geometric fracture characterization in limestone cliffs (Alps). Geophysics, 71(3), B85-B92.

Johnson, K. S. (1996). Gypsum karst in the United States. International Journal of Speleology, 25(3-4), 183-193.

Johnson, K. S. (2008). Gypsum-karst problems in constructing dams in the USA. Environmental geology, 53, 945-950.

Jol, H. M. (1995). Ground penetrating radar antennae frequencies and transmitter powers compared for penetration depth, resolution and reflection continuity1. Geophysical prospecting, 43(5), 693-709.

Jol, H. M. (2009). Ground Penetrating Radar: Theory and Applications, Oxford, Elsevier Science, 508p.

Jowkar, M. H., khamechian, M. A., & Nikudel, M. (2019). Evaluating Erodibility of gupsiferous soils of Masjed Soleyman petrochemical plant site with emphasiss on dispersive and solubility. Scientific Quarterly Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 12(1), 75-92. (In Persian)

Kalenda, P., & Tengler, R. (2022). A principal breakthrough in georadar technology – ROTEG. Geodynamics, 2, 75–90

Kalenda, P., Tengler, R., & Geršl, M. (2020). Test of the maximum penetration depth of the Roteg GPR above the Hranice Abyss and in the Moravian Karst. Geological research (in Moravia and Silesia), 27(1-2), 98-105.

Kamkar Rouhani, A., Eshaghi, E., & Arab Amiri, A. (2013). 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. Journal of the Earth and Space Physics. 38(4), 155-173. (In Persian)

Kareem, H. A., & Abd, N. A. (2024). Detection of subsurface archaeological features using the GPR method with a 250 MHz antenna in Borsippa site, Babylon, Iraq. Iraqi Journal of Science, 3788-3795.

Karimi, H. (2011). Formation mechanism of Jaber plain's dolines, south east of Ilam province.

Advanced Applied Geology. 1(2), 125-139. (In Persian)

Kiani, M., Sadrekarimi, J., & Fakhri, B. (2008). Gypsum dissolution effects on the performance of a large dam", International Journal of Engineering, 21(2), 143-150.

Kifae, A. A. (2010). Chemical and physical effects on engineering properties of gypseous subgrade soil. Al-Qadisia Journal for Engineering Sciences, 3 (3), 1-18.

Kim, Y. T., Kim, B., Kim, J. W., Park, H. M., & Yoon, J. S. (2016). Determining the optimal frequency of ground penetrating radar for detecting voids in pavements. International journal of highway engineering, 18(2), 37-42.

Klimchouk, A. (1996). The dissolution and conversion of gypsum and anhydrite. International Journal of Speleology, 25 (3), 21-36.

Klimchouk, A., Forti, P., & Cooper, A. (1996). Gypsum karst of the world: a brief overview. International Journal of Speleology, 25 (3-4), 159-181.

Knödel, K., Lange, G., & Voigt, H. J. (2007). Environmental Geology. handbook of field methods and case studies. Berlin: Springer.

Koh, G., & Wakeley, L. D. (2011). Impact of gypsum on electromagnetic properties of desert soils. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 8(6), 1051-1054.

Koutepov, V. M., Mironov, O. K., & Tolmachev, V. V. (2008). Assessment of suffosion-related hazards in karst areas using GIS technology. Environmental Geology, 54(5), 957-962.

Li, S., Ma, C., Liu, R., Chen, M., Yan, J., Wang, Z., Duan, S., & Zhang, H. (2021). Super-absorbent swellable polymer as grouting material for treatment of karst water inrush. International Journal of Mining Science and Technology, 31(5), 753-763.

Liu, D., Zhou, M., Wang, X., Shi, Z., Sacchi, M. D., Chen, W., Liu, Z., & Wang, X. (2024). Enhancing ground-penetrating radar (GPR) data resolution through weakly supervised learning. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 62, 1-13.

Łój, M., Gołębiowski, T., & Porzucek, S. (2014). Geophysical surveys and modelling for recognizing of gypsum karst. Geoinformatica Polonica, 13 (1), 83-97.

Lualdi, M., & Zanzi, L. (2004). 2D and 3D experiments to explore the potential benefit of GPR investigations in planning the mining activity of a limestone quarry. In Proceedings of the Tenth International Conference on Grounds Penetrating Radar. Pp, 613-616.

Madhoushi, M., & Hatefnia, H. (2022). Evaluation of the internal defaults and decay in old timber in building using non-destructive ground penetration radar (GPR) method. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research. 37(3), 217-228. (In Persian)

Makvendi, A., & Etezadi, P. (2011). Application of geosynthetic insulation (HDPE geomembranes for covering irrigation and drainage canals (Shahid Chamran Canal). 1st International and 3rd National Conference on Dams and hydropower. (In Persian)

Maleki, A., & Ovaisy, M. (2012). Recognizing Fault Structures and Studying the Evolution of Karst Sources Using Ground Penetrating Radar (Case Study: Kermanshah Province). Geography and Environmental Sustainability. 2(2), 1-10. (In Persian).

Matthews, M. C., Clayton, C. R. I., & Rigby-Jones, J. (2000). Locating dissolution features in the Chalk. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, 33(2), 125-140.

Maximovitch, G. A. (1962). Karst of gypsum and anhydrite of the globe (geotectonical relations, distribution, and major peculiarities). Obshchiye voprosi karstovedemiya: Moscow, Pp,108-113.

Milanovic, P. T. (1981). Karst hydrology. In Karst hydrology. Water Resources Publications.

Ministry of Roads and Urban Development of Iran. (2013). National Building Regulations of Iran, Topic 9, Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings, National Building Regulations Office, Fourth Edition, 373 pp. (In Persian)

Ministry of Roads and Urban Development of Iran. (2019). National Building Regulations of Iran, Topic 9, Design and Construction of Reinforced Concrete Buildings, National Building Regulations Office, Fifth Edition, 650 pp. (In Persian)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.1018981]

Mohamadi Vizheh, M., & Kamkar Rouhani, A. (2011). Investigation of Near Surface Buried Structures Using GPR and Resistivity Methods: A Case Study. Scientific Quarterly Journal of Geosciences. 20(80), 163-170. (In Persian)

Mohammadian, M. (2012). Study of engineering geological properties of Gachsaran Formation with emphasis on solubility and swelling in Ramhormoz region, Master's thesis in Engineering Geology, Bu-Ali Sina University, Hamadan (In Persian).

Mohammadian, M., Ghafori, M., & Ghobadi, M. H. (2015). A Study of the Gypsum Solubility of the Gachsaran Formation in East of Khuzestan Province and its Environmental Impacts. Advanced Environmental Sciences. 13(3), 11-24. (In Persian).

Mousavi, S. S. (2006). Study of rock durability and gypsum solubility for sealing the Khairabad Dam site in eastern Behbahan, Master's thesis in Engineering Geology, Bo Ali Sina University, Hamadan (In Persian).

Naseri, H. R., & Nikghojagh, Y. (2012). The role of gypsum karst in contaminant transportation from Agh Darreh tailing dam in Iran. Journal of environment studies, 38(1),41-48.

Nobes, D. C., & Deng, J. (2018). Ground penetrating radar resolution in archaeological geophysics. In Archaeogeophysics: State of the Art and Case Studies (Pp. 183-204). Cham: Springer International Publishing.

Özel, S., & Darıcı, N. (2020). Environmental hazard analysis of a gypsum karst depression area with geophysical methods: a case study in Sivas (Turkey). Environmental Earth Sciences, 79(5), 1-14.

Parhizkar, M. R. (2007). Investigation of engineering geological hazards in the area of Tang Sorkh Dam, Shiraz (with a special focus on gypsum solubility), Master's thesis in Engineering Geology, Tarbiat Modares University. (In Persian)

Patterson, D., Davey, J. C., Cooper, A. H., & Ferris, J. K. (1995). The application of microgravity geophysics in a phased investigation of dissolution subsidence at Ripon, Yorkshire. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28(1), 83-94.

Pipan, M. I. C. H. E. L. E., Forte, E., Guangyou, F., & Finetti, I. (2003). High resolution GPR imaging and joint characterization in limestone. Near Surface Geophysics, 1(1), 39-55.

Pourmehr, B., & Dargahi, J. (2002). Channel Dredging to Deal with Problematic Soil, Case Study: Khodaafrin Canal. 2nd Irrigation and Drainage Network Management National Conference, Ahvaz. (In Persian)

Prokhorenko, V., Ivashchuk, V., Stefanyshyn, I., Musiyachenko, S., Korsun, S., & Dykovska, O. (2009). Ground Penetrating Radar Exploration of Recently Discovered "Mushkarova Yama" Gypsum Cave (Western Ukraine), Speleology and Karstology, 3, 70–75.

Rahimi, H., & Yoosefi, A. (1995). Failure of underground water storage at Hengam Island due to being founded on salt Dome. Technical Report, Hormozgan Regional Water Board, Iran. (In Persian)

Ransome, F. L. (1928). Geology of the St. Francis Dam Site: Economic Geology, 23(3), 245–278

Rashydian, P., Keymanesh, R. K., & Ayoubinejad, J. (2023). Evaluation ability Ground Penetration Radar (GPR) in Determining Tensile Strength of The Applied Asphalt Layer. Journal of Transportation Research. 20(4), 143-154. (In Persian)

Reuter, F., & Tolmačëv, V. V. (1990). Bauen und bergbau in senkungs-und erdfallgebieten: eine ingenieurgeologie des karstes (Vol. 28). Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

Safari, A., Ghanavati, E. Z., Alijani, F., & Mohamadi, Z. (2018). Overview of karst landforms characteristics in the gypsum layers. Quantitative Geomorphological Research, 4(4), 17-39

Sari, M. S., & Bektaş, Ö. B. (2015). Investigating the geophysical characteristics of gypsum through GPR. In 8th Congress of the Balkan Geophysical Society, European Association of Geoscientists & Engineers.

Smith, D. G., & Jol, H. M. (1992). Ground-penetrating radar investigation of a Lake Bonneville deita, Provo level, Brigham City, Utah. Geology, 20(12), 1083-1086.

Smith, D. G., & Jol, H. M. (1995). Ground penetrating radar: antenna frequencies and maximum probable depths of penetration in

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]

Quaternary sediments. Journal of Applied Geophysics, 33(1-3), 93-100.

Soldovieri, F., Crocco, L., Brancaccio, A., Solimene, R., & Persico, R. (2011). Applications of ground penetrating radar and microwave tomography in water monitoring and management. International Water Technology Journal, IWTJ, 1(1), 1-9.

Solis, R., & Zhang, J. (2008). Gypsiferous Soils: An Engineering Problem." Sinkholes and the engineering and the invironmental impacts of karst, Pp, 742-748.

STN EN 206-1 (Slovak Institute for Technical Normalization). (2002), Concrete. Part 1: specification, performance, production and conformity. Slovak Institute for Technical Normalization, Bratislava, Publication No. 85349:72

Sucre, E. B., Tuttle, J. W., & Fox, T. R. (2011). The use of ground-penetrating radar to accurately estimate soil depth in rocky forest soils. Forest Science, 57(1), 59-66.

Tavosi, N., Farrokhnia, A., & Hoshyaripour, F. (2018). Investigation of the effect of Gachsaran soluble formation on the amount of dissolved salts in the Parsian Dam, Eighth International Conference on Sustainable Development, Urban Development and Reconstruction papers. (In Persian)

Tolmachev, V., Ilyin, A., Gantov, B., Leonenko, M., Khomenko, V., & Savarensky, I. (2003). The main results of engineering karstology research conducted in Dzerzhinsk, Russia (1952–2002). In Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst (pp, 502-518).

Torabi, K, M. (2010). Study of the solubility of gypsum in the Gachsaran Formation at the Chamshir Dam site, Master's thesis in Engineering Geology, Bu-Ali Sina University, Hamadan. (In Persian)

Williams, P. (2004). Dolines. In: Gunn, J. (Ed.), Encyclopedia of Caves and Karst Science, Fitzroy Dearborn, New York, NY, Pp, 304–310.

Wu, Y., Han, C., Huang, Y., Zhang, W., Luo, M., Xu, P., & Liu, Q. (2024). Study on the Behavior and State of Viscous Fractured Leakage Bridging and Plugging Slurry during the Pump-In and Pressurization Process. Processes, 12(203), 1-18.

Wunderlich, T., & Rabbel, W. (2013). Absorption and frequency shift of GPR signals in sandy and silty soils: empirical relations between quality factor Q, complex permittivity and clay and water contents. Near Surface Geophysics, 11(2), 117-128.

Yilmaz, I. (2001). Gypsum/Anhydrite: Some Engineering Problems. Bulletion of Engineering Geology and the Environment, 59, 227-230

Zamin Physic Pooya Company. (2015). Soil Investigation of MIS Fertilizer Project. Final Soil Investigation Report. 145 page

Zhai, M., & Bai, H. (2022). Precise application of grouting technology in underground coal mining: water inrush risk of floor elimination. Environmental Science and Pollution Research, 30(9), 24361-24376.

Zhai, M., Ma, D., & Bai, H. (2022). Diffusion mechanism of slurry during grouting in a fractured aquifer: a case study in Chensilou Coal Mine, China. Mathematics, 10(1345), 1-13.

Zhang, W., Wu, F., Han, C., Li, X., Peng, Z., Ren, Q., Yang, F., & Zhang, D. (2022). Criterion of grouting pressure in regional advance grouting treatment to prevent water disaster from karst aquifers in coal seam floors. ACS omega, 7(33), 29274-29286.

Zhang, Y., Wang, S., Zhang, B., Hou, D., Li, H., Li, L., Wang, J., & Lin, C. (2020). A preliminary investigation of the properties of potassium magnesium phosphate cement-based grouts mixed with fly ash, water glass and bentonite. Construction and Building Materials, 237(2), 117501.

Zhou, H., & Sato, M. (2001). Archaeological investigation in Sendai Castle using ground-penetrating radar. Archaeological Prospection, 8(1), 1-11.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-10-30]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.3.3.0]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.3.10189981]