

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

Mohammad Hossein Jowkar¹, Mashallah khomehchiyan^{2✉}, Mohammad Reza Nikudel³, Asghar Azadi⁴

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: khomehchm@modares.ac.ir
3. Associate professor, Faculty of Engineering geology Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: nikudel@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., khomehchiyan, 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).

DOI: <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1018981>

Publisher: Kharazmi University.

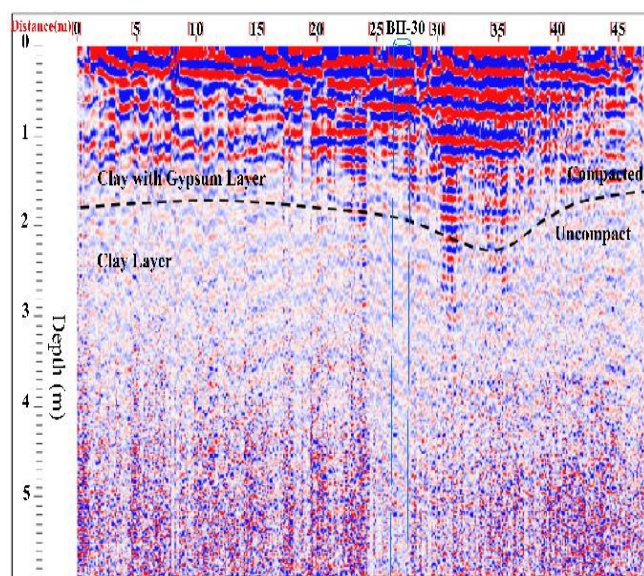
Materials and Methods

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,

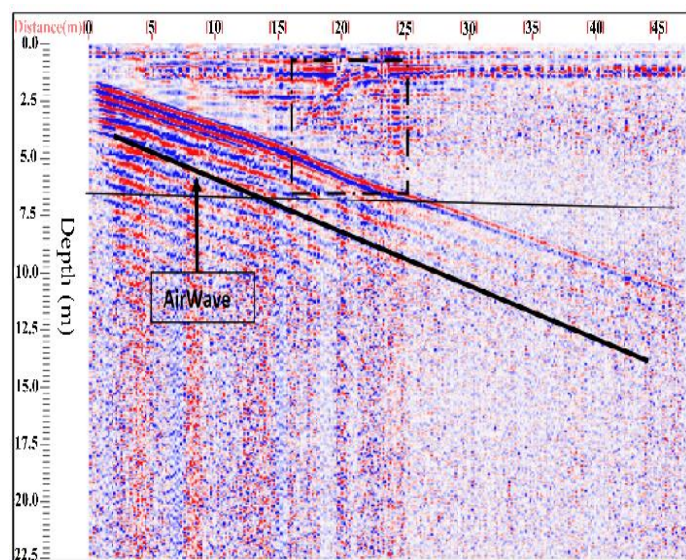
Profile 1 (47.5 m long), acquired in the eastern part of the site, was correlated with geotechnical data from borehole BH-30, located along approximately 27 meters in the GPR survey line (Figure 1). The correlation indicates that, to a depth of approximately 2 to 4 meters, the subsurface consists of 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

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

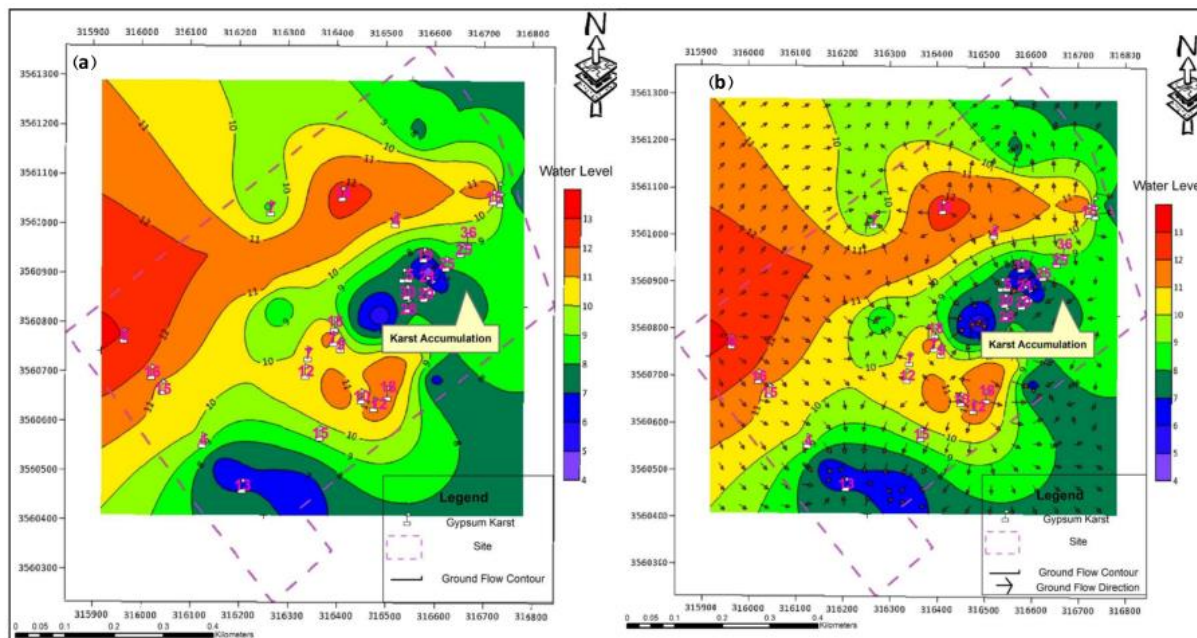


Fig 2. a) Illustrates the connection between gypsum karst and groundwater levels, b) location of the gypsum karst accumulation within the direction of groundwater flow

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.



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

محمدحسین جوکار^۱، ماشالله 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

چکیده

اطلاعات مقاله

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 ۴-۳۶ 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. در نهایت با نمونه‌برداری از آب زیرزمینی و انجام آزمایش‌های شیمی آب میانگین مقدار سولفات آب زیرزمینی ۱۴۸۰ ppm به دست آمد که این شرایط محیطی از نظر هجوم سولفات شدید می‌باشد.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۱۷

کلیدواژه‌ها:

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

مقدمه

وسعت اراضی که در آن سنگ‌های سولفاته در سطح یا عمق زمین رخنمون دارند زیاد است به‌طوری‌که تخمین زده می‌شود رسوبات تبخیری، ژئوپس 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

; Maximovitch, 1962). به‌نحوی که 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 زمین‌شناسی مهندسی، ۱۹ (۳)، ۲۷۸-۴۱۳. <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.3.1018981>



به عنوان اولین سازند گروه فارس به شمار می آید که سنگ شناسی کلی آن در فروافتادگی دزفول مشتمل بر حدود ۱/۶ کیلومتر نمک، انیدریت، مارن های رنگارنگ، سنگ آهک و یک لایه شیل بیتومین دار است و در سطح زمین به جای انیدریت بیشتر ژئیس دیده می شود و نمک نیز به ندرت در سطح زمین یافت می شود (Amiri Bakhtiar and Klimchouk et al., 1996; Noorani Nejad, 2014).

واژه کارست به مجموعه ای از فرایندهای زمین شناسی و پدیده های حاصل از آن ها در پوسته و سطح زمین گفته می شود که عمدتاً شامل پدیده های ناشی از انحلال سنگ ها می باشد و با تشکیل بازشدگی ها، تخریب و تجزیه ی ساختمان سنگ ها و ایجاد نوع ویژه ای از رژیم گردش آب، نوع خاص توپوگرافی منطقه و بالاخره تشکیل رژیم خاصی از زهکشی آشکار می گردد (Milanovic, 1981).

فرآیندهای توسعه ویژگی های کارستی در گچ با آن هایی که در سنگ آهک و دولومیت، شکل می گیرند یکسان است با این تفاوت که فرآیندها بسیار سریع تر هستند. حلالیت $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ از حدود ۲۶۰۰ تا ۲۲۰۰ ppm در محدوده دمایی ۴۰-۰ درجه سانتی گراد متغیر است (Johnson, 1996). در واقع به دلیل حلالیت بالا ۲/۵۳۱ gr/lit در ۲۰ درجه سانتی گراد آب مقطر (Klimchouk, 1996) و سرعت انحلال سریع، کارست در گچ می تواند در یک مقیاس زمانی سریع توسعه و تکامل یابد چنانچه اندازه گیری های آزمایشگاهی و میدانی نشان می دهد که آب شیرین با سرعت ۱ متر در ثانیه می تواند ۱/۸ - ۱/۷ متر گچ را در یک سال حل کند (James, 1992; Dreybrodt, 2004). در جاهایی که آب شور وجود دارد، حلالیت گچ ممکن است تا ۴ برابر افزایش یابد. بنابراین در این شرایط یا جایی که جریان متلاطم آب شیرین وارد کارست های گچی زیرزمینی می شود، سرعت حذف گچ بسیار افزایش می یابد (Cooper and Gutiérrez, 2013). همچنین درجایی که گچ با

سنگ های کربناته مجاور در تماس است وجود سولفات در آب سرعت انحلال دولومیت را افزایش می دهد به نحوی که برای آب با محتوای ۱ میلی گرم در لیتر سرعت انحلال دولومیت ۱/۶۷ میلی گرم در لیتر بود در حالی که سرعت انحلال سنگ آهک ۰/۹۴ میلی گرم در لیتر می باشد. بعلاوه، وجود یون های سدیم، منیزیم و کلرید (احتمالاً از دولومیت ها و بسترهای هالیت به دست آمده) می تواند به انحلال گچ سرعت ببخشد (James, 1992). در مجموع این قابلیت بالای انحلال نشان می دهد که شدت و میزان توسعه انحلال و کارست در ژئیس بیش از سنگ های کربناته است (Gutierrez et al., 2008a; Al-Saoudi et al., 2013).

بر اساس فرایند انحلال پذیری و آبشویی گچ و ژئیس، عوارض کارستی که عموماً کارست گچی نامیده می شود در مناطق مستعد به وجود می آیند (Ford and Williams, 2007).

گچ ها مقاومت مکانیکی پایین تر و شکل پذیری بسیار بیشتری نسبت به سنگ های آهکی دارند. علاوه بر آن به دلیل حلالیت و سرعت انحلالی بالای گچ، توسعه عوارض کارستی در آن بسیار سریع تر از سنگ آهک رخ می دهد، بنابراین کارست های گچی می توانند به جای مقیاس زمان زمین شناسی، در مقیاس زمانی انسانی تکامل یابند (Gutierrez et al., 2008c; Gutierrez et al., 2008b).

هیدروژئولوژی آبخوان های دارای کارست گچی عمدتاً تابع لایه بندی، محل تغذیه و خروج آب (شرایط مرزی) و تخلخل ثانویه که در زمان متغیر می باشند است و شروط اساسی برای توسعه کارست گچی عبارتند از: ۱- حضور ژئیس و انیدریت؛ ۲- حضور آب، در شرایط غیراشباع با CaSO_4 ، ۳- خروج آب در حال حل شدن و ۴- انرژی برای عبور آب (Johnson, 1996; Klimchouk, 1996). خرابی های زیرسطحی ناشی از انحلال گچ نیز عبارتند از: ریزش حفرات منفرد، جابه جایی حفرات و حفره زایی تدریجی (Solis and Zhang, 2008).

از مشخصه های چشم اندازهای کارستی کربناتی و تبخیری

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). حال آنکه، 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، از جمله پاریس (فرانسه)، دزرژینسک (Dzerzhinsk) (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). به‌نحوی که در شهر سارگوسا اسپانیا زندگی حدود ۷۰۰۰۰۰ نفر به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مناطق شهری، تحت تأثیر گچ و سایر انحلال‌های تبخیری قرار گرفته 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 Tolmačev, 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 فونتائل (Fontanelle) در اوکلاهاما، سدهای هورس توث (Horsetooth) و کارتر (Carter) در کلرودو و سد موزس ساندروز 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 خلیج فارس (Rahimi and Yoosefi, 1995). نشت زیاد آب در سد مخزنی قیصرآغ تبریز (Fakhri et al., 2008) تخریب

می‌تواند 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). حال آنکه، 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، از جمله پاریس (فرانسه)، دزرژینسک (Dzerzhinsk) (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). به‌نحوی که در شهر سارگوسا اسپانیا زندگی حدود ۷۰۰۰۰۰ نفر به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین مناطق شهری، تحت تأثیر گچ و سایر انحلال‌های تبخیری قرار گرفته 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 Tolmačev, 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 فونتائل (Fontanelle) در اوکلاهاما، سدهای هورس توث (Horsetooth) و کارتر (Carter) در کلرودو و سد موزس ساندروز 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 خلیج فارس (Rahimi and Yoosefi, 1995). نشت زیاد آب در سد مخزنی قیصرآغ تبریز (Fakhri et al., 2008) تخریب

زیرزمینی تلاش گردید پیشنهادهایی جهت حل مسئله کارست‌های گچی در منطقه ارائه گردد.

مبانی نظری و فیزیکی روش رادار نفوذی زمین (GPR)

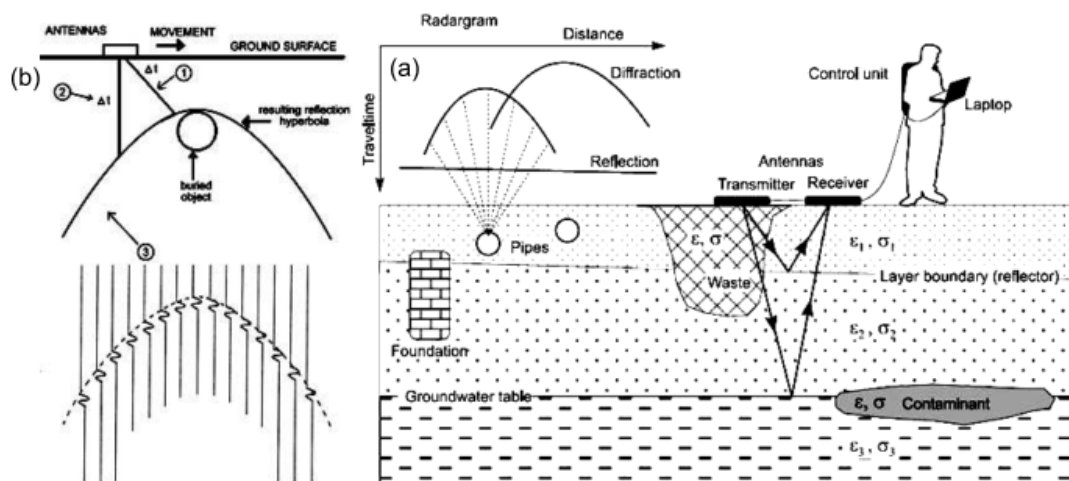
در سال‌های اخیر، پیشرفت روش‌های ژئوفیزیکی به دلیل پیشرفت علوم و فناوری، توسعه تجهیزات صحرایی و همچنین حسابگرهای راقومی که در تحلیل داده‌های ژئوفیزیکی کاربرد فراوانی دارند بسیار سریع بوده است. در این میان سیستم‌های راداری به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد خود از قبیل قابلیت استفاده در شب، انرژی بالا (به دلیل داشتن طول موج 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 (Rashyadian et al., 2023). که در این میان، روش رادار نفوذی زمین جایگاه ویژه‌ای در این سیستم‌ها به دلیل ارزیابی غیرمخرب مهندسی پیدا کرده 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) با قدرت تفکیک بالا، پوشش مساحت قابل توجه در زمان کوتاه، عدم نیاز به منبع انرژی خارجی (فعال بودن سیستم)، عدم تخریب محیط زیست 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 فلزهای معمولی)، قابلیت نفوذ در محیطی غیر از هوا و عمل کردن در محدوده وسیعی از فرکانس‌ها از جمله مزایای سیستم GPR می‌باشد

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.

حال آنکه کارست‌های گچی علیرغم رخداد گسترده و اهمیت وابسته به آن از لحاظ کاربردی (مخاطرات، اثرات و منابع) کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند به‌نحوی که مطالعات در زمینه کارست‌های گچی از دهه ۱۹۹۰ آغاز گردیده و به تدریج 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) حفر شده بود، تلفیق شده 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. در نهایت نیز ضمن بررسی شیمی آب

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 (شکل ۱) 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 باین‌حال، 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. حال آنکه، خاک‌ها و سنگ‌های خشک و مقاوم، منجر به نفوذ سیگنال در اعماق بیشتر می‌شوند (Fenning and Hasan, 2003; Hendrickx et al., 2000; Matthews et al., 1995).

(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 ۱۰-۱۰۰ 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



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.

تعیین شده 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 اشاره شده، 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

همچنین با توجه به اندازه و جنس هدف، تشخیص اهداف بزرگ‌تر یا با کنتراست بالاتر در عمق آسان‌تر است. با این حال، اشیاء فلزی، سیگنال‌ها را به‌طور کامل مسدود می‌کنند. در مجموع در شرایط بهینه، GPR می‌تواند از ۱۴ متر تا ۲۸ متر در فرکانس‌های ۲۵ تا ۲۰۰ مگاهرتز نفوذ کند (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 گزارش شده 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

2012)، مقایسه ضریب ثابت انحلال مصالح ژئوپس و انیدریت در سد مراش زنجان (Bazargan and Moazzami, 2021) نمونه‌هایی از پژوهش‌های انجام شده است. نتیجه این پژوهش‌ها، لزوم توجه به انحلال ژئوپس 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 به صورت دستی و خودکار ثبت می‌گردد (Cailleux and Toulemon, 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. در نهایت 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 ژئوپس 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

رطوبت خاک، ترکیب مواد معدنی و تخلخل، تصویربرداری GPR را پیچیده کند (Pipan et al., 2003; Caselle et al., 2020). باین حال شواهد بررسی GPR در محیط‌های ژئوپسی - گچی محدود است و نیاز به انجام تحقیقات جامع‌تری برای تعیین دقیق تأثیر دقیق گچ بر کیفیت تصویر GPR است. در نهایت 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 Roteq 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., 2022; Kalenda and Tengler, 2022).

ارزیابی ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی کارست‌های زیرسطحی گچی

اگرچه با توجه به بالا بودن قابلیت انحلال ژئوپس‌های سازند گچساران و سازندهای کربناته، کارست یک پدیده رایج و توسعه‌یافته در فلات‌های ایران خصوصاً در کوه‌های زاگرس می‌باشد. اما باوجود گسترش زیاد سنگ‌های ژئوپسی در ایران، پژوهش‌ها به موضوع شناخت قابلیت انحلال این نوع سنگ‌ها به روش سیرکولاسیون محدود شده است. که بررسی انحلال‌پذیری ژئوپس‌های سازند گچساران در محل سد تنگ شمیران ایلام (Baghdardokht, 2005)، ارزیابی میزان انحلال ژئوپس‌های سازند آغاچاری در ساختگاه سد خیرآباد بهبهان (Mousavi, 2006)، تعیین انحلال ژئوپس‌های سازند گچساران در سد تنگ سرخ (Parhizkar, 2007)، مطالعه انحلال‌پذیری ژئوپس‌های سازند گچساران در محل سد چم‌شیر (Torabi, 2010) و بررسی انحلال‌پذیری ژئوپس‌های سازند گچساران در منطقه رامهرمز (Mohammadian, 2012)

زیرسطحی وجود دارد. ملکی و اویسی (Maleki and Ovaisy, 2012) با استفاده از GPR به بررسی چشمه‌های کارستی سراب یآوری 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 واقع شده به مراتب کمتر از چشمه سراب یآوری 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 ژئیس در مخزن و پی سد مجاری انحلالی شکل گرفته و از این طریق نشأت آلاینده به پایین دست 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 ژئوسی 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

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 موشکارو یاما (Mushkarova Yama) در اوکراین پرداختند و گزارش کردند ورودی غار در پایین فروچاله است و بر اساس نقشه‌برداری کنونی طول غار بیش از ۵۰۰ متر است و برخی از گالری‌های شناخته‌شده تا عمق ۱۲ متری از سطح زمین قرار دارند. ایستردا - 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 تشکیل شده و اکثراً از نوع ریزشی بوده که به دلیل نوسانات آب زیرزمینی در منطقه تشکیل شده‌اند 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

زمینی نشان داده شده‌اند توده‌های گچی عظیم همگنی نیستند که در مطالعات زمین‌شناسی ارائه شده‌اند و حاوی مواد پرکننده (مواد آواری) با اندازه و موقعیت متفاوت هستند، بنابراین گچ در این منطقه حاوی شکستگی‌ها، ترک‌ها، پرشدگی‌ها و فضاهاى 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 تجزیه و تحلیل قرار داده و گزارش کردند این روش به دلایل غیر مخرب بودن، هزینه‌های اقتصادی به صرفه، وضوح بالا 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 زمان گیرش، 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. به‌نحوی که 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 به‌نحوی که 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

را به عنوان 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 رشته کوه هیمالیا ایفا می‌کند به نحوی که آن‌ها با استفاده از تکنیک تداخل سنجی راداری گزارش کردند که منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۲۳-۲۰۱۴ با نرخ ۲۹ mm/year 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 به سرعت شکل می‌گیرند و رشد می‌کنند و می‌توانند منجر به مقادیر قابل توجهی 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 مورد مطالعه، از تلفیق روش ژئوفیزیکی (GPR) و ژئوتکنیکی (حفر گمانه) جهت شناسایی و بررسی کارست‌های گچی در مجتمع پتروشیمی مسجدسلیمان استفاده گردید به نحوی که این روش‌ها بتوانند معایب یکدیگر را پوشش دهند و به بالاترین کارایی در ارزیابی هدف پروژه دست یافت در نهایت نیز موقعیت کارست‌های گچی شناسایی شده با الگوی زهکشی سطحی، آب زیرزمینی و نتایج آزمایش SPT مورد ارزیابی قرار گرفت.

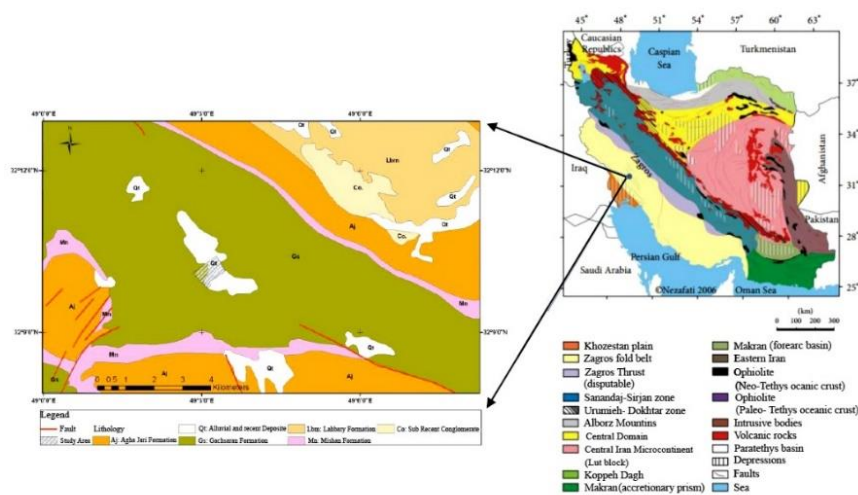
موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی گستره طرح

مجتمع پتروشیمی اوره و آمونیاک مسجدسلیمان با مساحت حدود ۵۱۰ هزار مترمربع در منطقه‌ای با طول جغرافیایی ۴۹/۰۵ و عرض جغرافیایی ۳۲/۱۶ در سی و پنج کیلومتری شمال غربی شهرستان مسجدسلیمان در استان خوزستان، در مجاورت روستای هفت شهیدان واقع شده است. منطقه مورد مطالعه مطابق شکل ۲ در پهنه زمین‌شناسی فروافتادگی

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 قرار دادند و نواحی بدون خطر را به عنوان 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 $2-2/6 \text{ gr/cm}^3$ 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 در نهایت تحکیم زمین از طریق تزریق ملات کم‌تحرك 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

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.

دزفول بر روی سازند گچساران (حاوی خاک‌های ریزدانه گچ دار و سنگ‌های تبخیری) و نهشته‌های کواترنری قرار گرفته 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



شکل ۲. موقعیت و نقشه زمین‌شناسی سایت پتروشیمی مسجدسلیمان

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

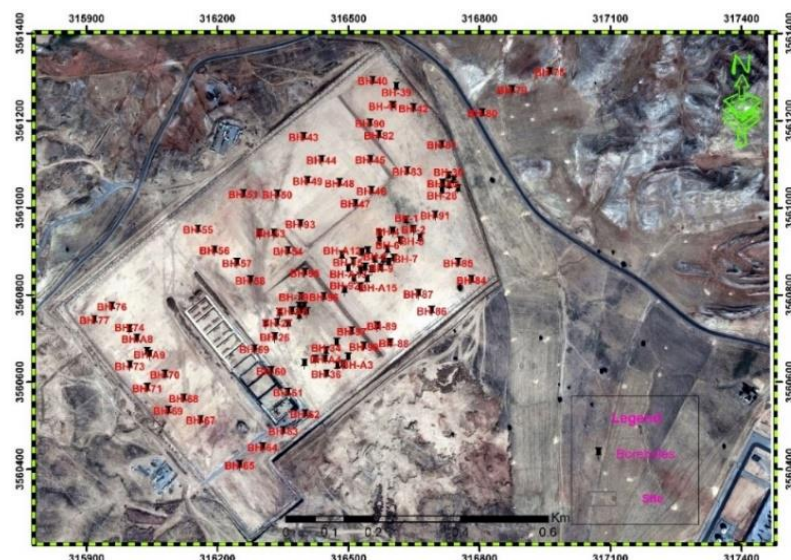
مواد و روش‌ها

ساختارهای زیرزمینی مانند دیواره‌های 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)

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 از جمله 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

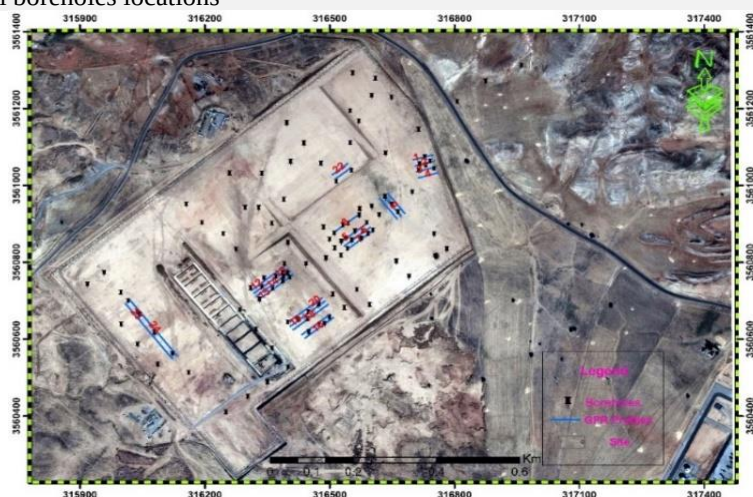
به ازای هر پروفیل مختصات یک نقطه نیز برداشت شده و به صورت خودکار در حافظه دستگاه ذخیره شد و به همراه فایل های مربوط به داده های GPR به کامپیوتر انتقال یافت که در شکل های ۳ و ۴ موقعیت کل گمانه های ژئوتکنیکی حفر شده (Zamin Physic Pooya Company, 2015) و پروفیل های GPR و ارتباط آن ها با یکدیگر قابل مشاهده است. در ادامه با توجه به حساسیت پروژه جهت بررسی مصالح زیرسطحی ساختگاه، شناسایی حفره ها و کارست های گچی و دستیابی به نقشه سطح ایستایی 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 آن ها اطلاعات گمانه هایی که در آن ها کارست گزارش شده بر روی تصاویر ماهواره ای کرونا مربوط به سال ۱۹۶۸ میلادی، تصاویر گوگل ارث و نقشه های زهکشی آب های سطحی و زیرزمینی (تهیه شده با اندازه گیری تراز سطح آب گمانه ها با استفاده از عمق یاب دارای سنسور الکتریکی) پیاده سازی و رقومی سازی گردید. در نهایت نیز پس از نمونه برداری 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 آزمایش های شیمی آب (در مجموع در تعداد ۴۰ آزمایش)، مورد اندازه گیری قرار گرفت و سپس نتایج آن ها 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.

(Estrada-Medina et al., 2010)، ۳- تشخیص حفره های 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 کارست ها در جبهه های حفاری فضاهای زیرزمینی تا عمق ۳-۴ متری (Caselle et al., 2020)، ۵- ارزیابی بهتر منطقه با خاک رسی - سیلتی نسبت به فرکانس های بالاتر (۵۰۰ مگاهرتز) (Al-Khersan et al., 2021) و ۶- شناسایی دیوارهای باستانی با بازتاب های واضح تا عمق نفوذ ۴ متر (Kareem and Abd, 2024). در ادامه از آنجاکه استفاده از فرکانس های پایین به دلیل رابطه معکوس بین فرکانس و عمق نفوذ و وضوح نگاشت های راداری چالش برانگیز بوده بنابراین جهت تصحیحات و پردازش های مورد نیاز از نرم افزار Reflexw استفاده شد. به منظور غلبه بر محدودیت های ذاتی و نوفه های موجود در داده های خام با انجام تصحیحات، تصحیح خطاهای ناشی از برداشت میدانی، حذف سیگنال های 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 داده ها تا پالس اولیه (اولین برگشت) در زمان صفر قرار گیرد))، حذف نویزهای مغناطیسی زمینه (Background Removal) (یعنی حذف سیگنال های تکراری و غیر مرتبط که در همه رده ها ثابت هستند)، اعمال انواع بهره ها (Gains) جهت تقویت سیگنال کاهیده شده در عمق و اعمال فیلتر میان گذر (Band pass) جهت افزایش نسبت سیگنال به نویز داده ها، تبدیل داده های زمانی به عمق (Time Depth Conversion) با استفاده از سرعت موج و اصلاح هندسی بازتاب ها (یعنی تبدیل سهمی های بازتابی به موقعیت واقعی شان در فضا (عمل مهاجرت (Migration))، نگاشت های راداری پردازش گردیدند. همچنین در زمان برداشت داده ها، با استفاده از GPS نصب شده روی دستگاه،



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

نتایج و بحث

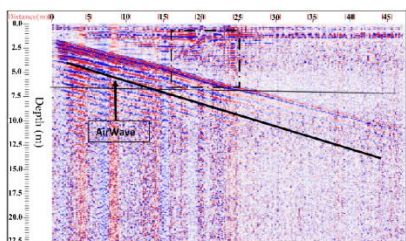
تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی GPR

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 ژیبسی 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) تشکیل شده 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 مشخص شده 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 تشکیل شده است و بعدازآن مصالح به سنگ ژیبس تبدیل می‌گردند. همان‌طور که در شکل ۵ (تصاویر ردیف شماره ۲) مشخص است در این سطح نیز پدیده

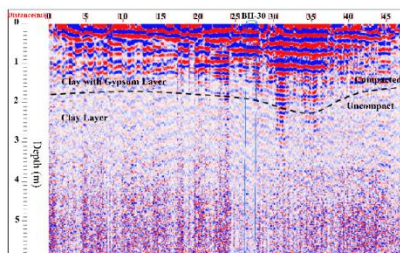
Airwave واضح است و همچنین در نگاشت راداری با فرکانس ۲۵۰ HZ این پروفیل، لایه سطحی دست‌خورده و متراکم (خط‌چین) قابل مشاهده است. پروفیل شماره ۵ به طول ۷۸ متر از محدوده جنوب منطقه برداشت گردید با ارتباط این پروفیل با اطلاعات ژئوتکنیکی گمانه‌های BH-10، BH-A7، BH-8 و BH-6 به ترتیب در طول و امتدادهای ۱/۵، ۱۳، 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 تشکیل شده است و بعدازآن مصالح زمین‌شناسی عمدتاً سنگ ژیبس 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 قابل مشاهده 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) قابل مشاهده است در این بخش نیز تغییر در لایه‌بندی و برخی از روند لایه، نشست‌های 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- و 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

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.

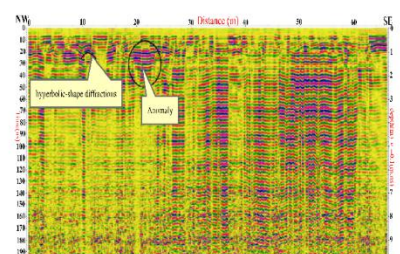
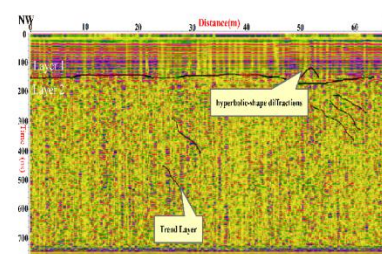
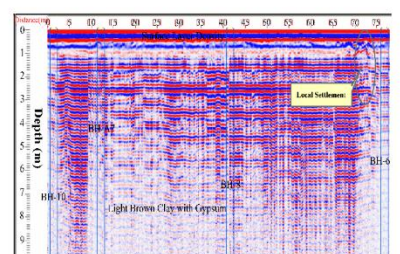
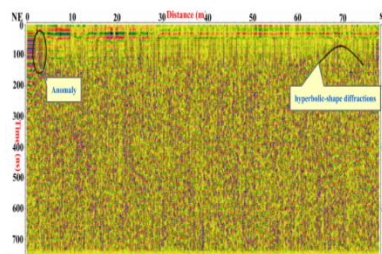
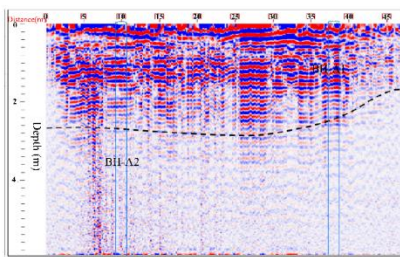
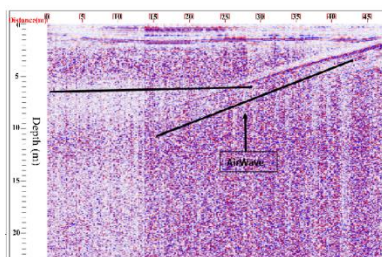
GPR Profiles _Antenna 50 MHz



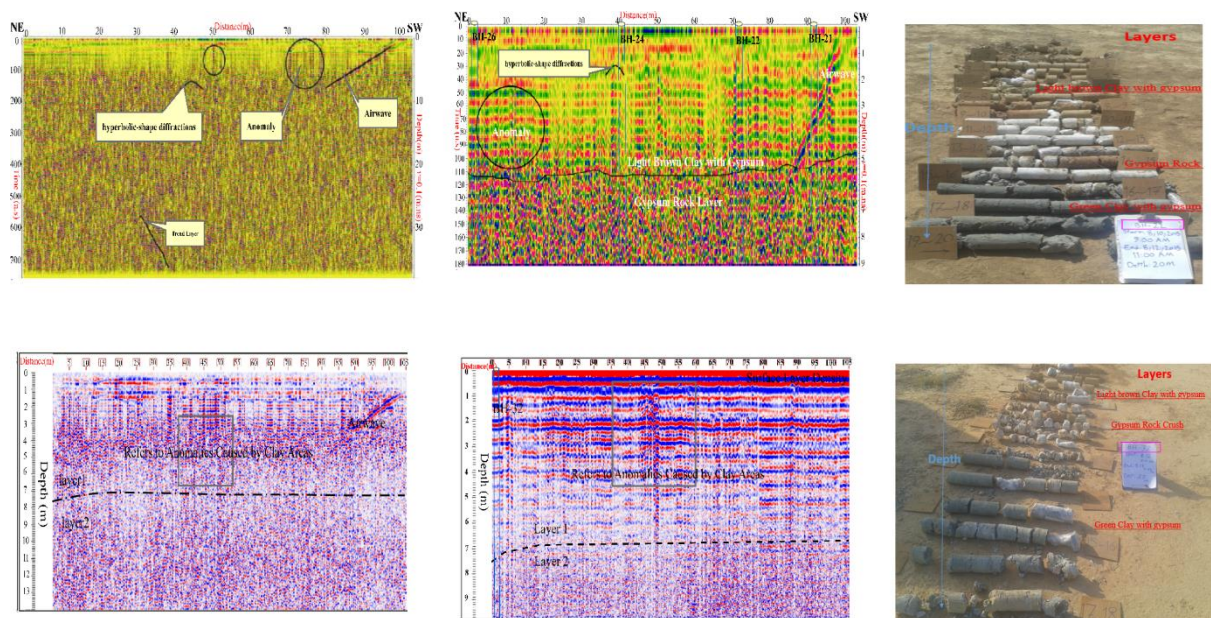
GPR Profiles - Antenna 250 MHz



Geotechnical Evidence's



Lack of Geotechnical Evidence



شکل ۵. تفسیر نگاشت‌های راداری با فرکانس ۵۰ و ۲۵۰ MHz 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

فرکانس ۵۰ و ۲۵۰ مگاهرتز حداکثر تا عمق ۱۰ متری آثار حفرات زیرسطحی که در اصطلاح ژئوفیزیکی به آن میرایی سیگنال (Signal Damping) می‌گویند در پروفیل‌ها به صورت 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.

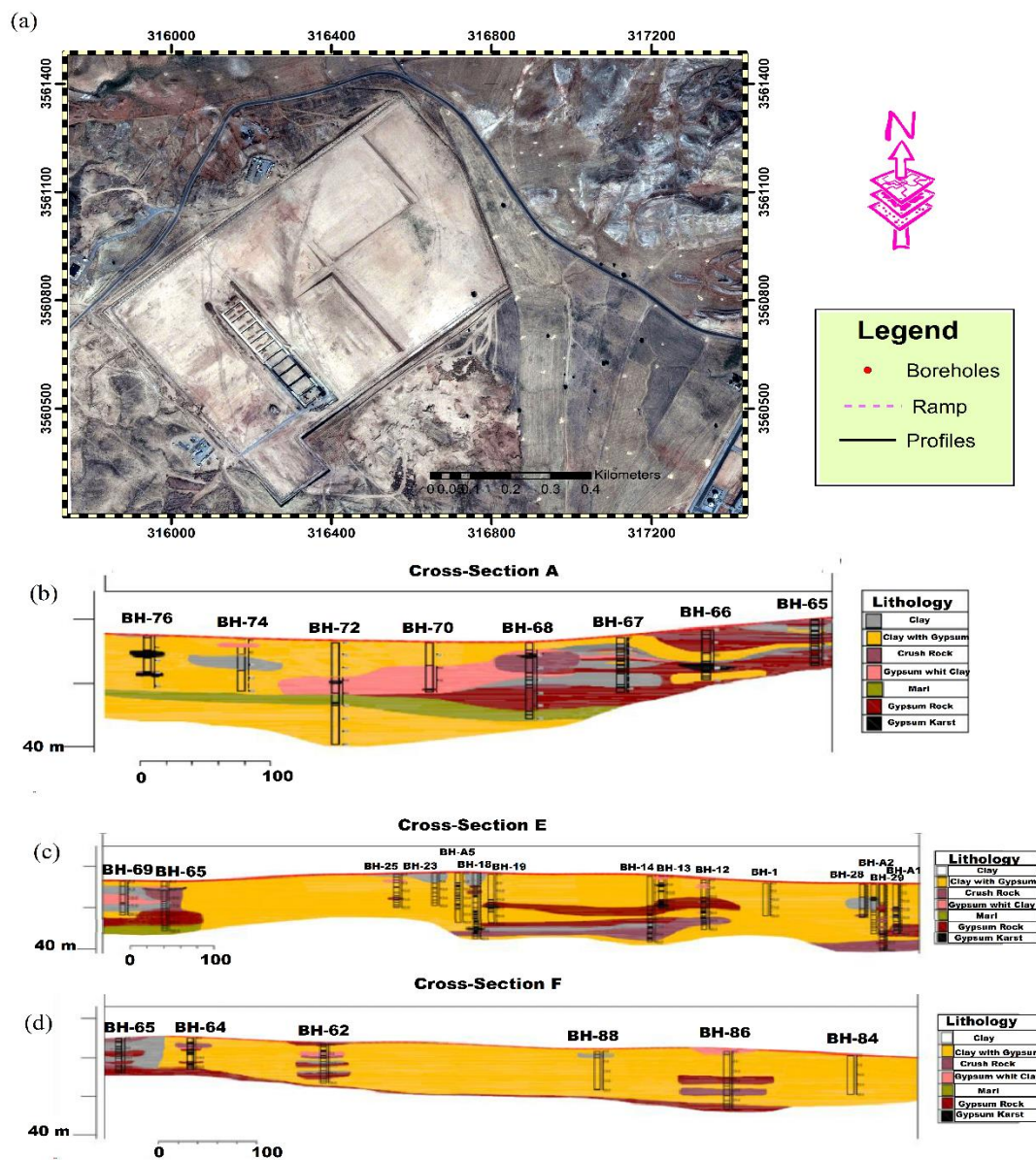
تجزیه و تحلیل داده‌های ژئوتکنیکی

انطباق کارست‌های گچی با پروفیل‌های زمین‌شناسی
جمع‌بندی اطلاعات ژئوفیزیکی و ژئوتکنیکی محدوده مورد مطالعه 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 به صورت طولی و عرضی مطابق شکل ۶-ا در جهات مختلف محدوده مورد مطالعه مطابق شکل‌های ۶-ب، ۶-ج، ۶-د، مشخص گردید عمده کارست‌های گچی به موازات

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. باین‌حال، 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

گفت حفره‌های کم‌عمق مانند قسمت جنوبی (شکل ۶-د) محدوده مورد مطالعه مربوط به انحلال خاک‌های گچی باشد و حفره‌های عمیق در سنگ‌های ژئوسی و انیدریتی احتمالاً به دلیل تماس جریان آب زیرزمینی تشکیل شده است.

مقطع E (شکل ۶-ج)، 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 ژئپس در قسمت شرقی در اعماق و در قسمت غربی در سطح و عمق گمانه‌ها دیده می‌شود. در مجموع می‌توان



شکل ۶. 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.

پتروشیمی تخلیه شده و قسمتی از رواناب سطحی نیز به حرکت با سمت غرب سایت از منطقه زهکشی می شده است (شکل ۷-د).

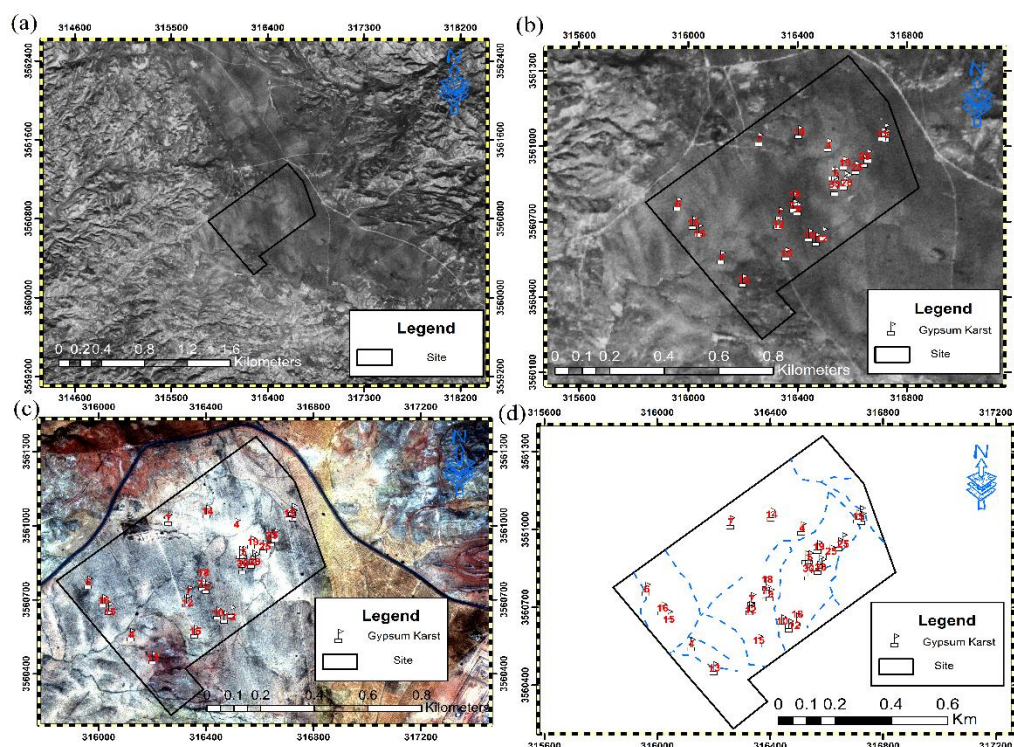
انطباق کارست‌های گچی با وضعیت آب زیرزمینی منطقه

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 زمین‌آماري کریجینگ تهیه شد. نتایج حاکی از آن بود که جریان آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه نسبتاً پیچیده و سطح آب زیرزمینی در عمق متوسط ۱۰-۹ متر می‌باشد. همچنین با پیاده‌سازی کارست‌های گچی شناسایی شده، در اعماق مختلف، که موقعیت آن‌ها با عمق برخورد به کارست‌ها در شکل ۸ قابل مشاهده است. مشخص گردید که حفرات و کارست‌های گچی منطقه در اعماق ۳۶-۴ متری سطح زمین با عمق میانگین ۱۶ متری تشکیل شده‌اند که از مجموع ۳۲ حفره و کارست شناسایی شده تعداد ۲۳ مورد از آن‌ها با عمق میانگین ۱۹/۶ در زیر سطح آب زیرزمینی واقع شده‌اند و تعداد ۹ مورد از آن‌ها با عمق میانگین ۶/۵ متر بالای سطح آب زیرزمینی تشکیل شده‌اند. 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-ا) و تشکیل آن‌ها در محل تجمع جهت جریان آب زیرزمینی (Under Ground Water Flow Direction, UGWFD) (شکل ۸-ب) نقش آب زیرزمینی و تغییرات آن در منطقه پررنگ‌ترین عامل در تشکیل کارست‌های گچی می‌باشد (جدول ۲).

درواقع هر جا که لایه‌های گچ دار نزدیک سطح زمین قرار گرفته 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 به هم‌ریخته 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 به صورت لایه مشخصی تعقیب نمود. علاوه بر این وجود گچ، انیدریت و نمک در این سازند که دارای پتانسیل انحلال و افزایش حجم می‌باشند، موجب به هم‌ریختگی بیشتر سنگ‌ها و انقطاع لایه‌ها و ایجاد عوارض کارستی به صورت فرو چاله‌ها، کانال‌های مدفون در طی زمان شده است.

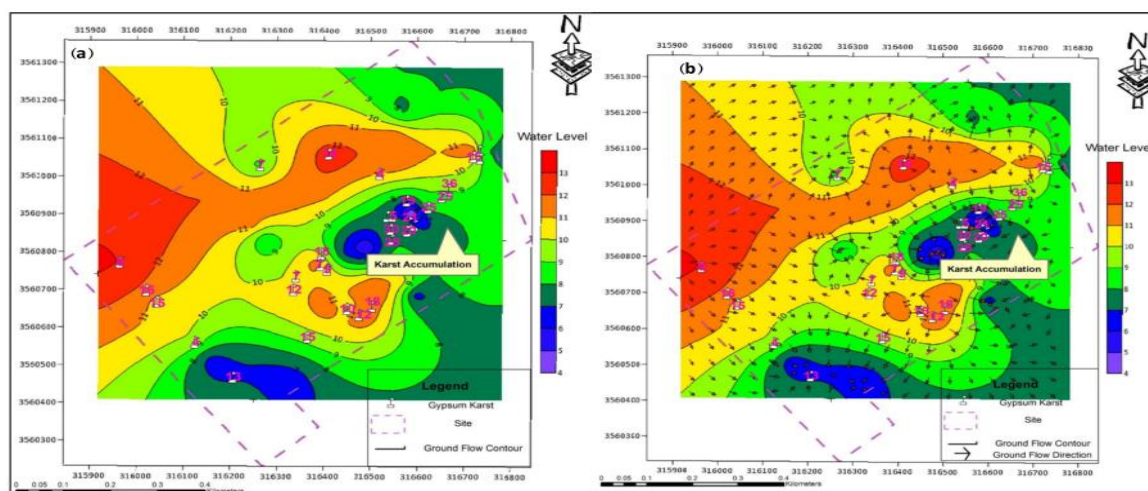
انطباق کارست‌های گچی با شبکه آبراهه‌های سطحی

در شرایط فعلی ساختگاه مورد نظر 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 به نحوی که رواناب سطحی اراضی بالادست و ارتفاعات در آن زهکشی می‌شده است (شکل ۷-ا). و می‌توان الگوی ریزبافت، درختی و منفرد مجاری آب‌های سطحی را به دلیل رخنمون سازند گچساران در منطقه مشاهده کرد (شکل ۷-ب). با بررسی تصاویر ماهواره‌ای و گوگل ارث می‌توان دریافت تا سال ۲۰۱۱ میلادی الگوی زهکشی منطقه تفاوتی نداشته، تپه‌ماهورهای منطقه توسط خطوط تقسیم آب‌های سطحی جدا می‌شده است (شکل ۷-ج). به‌طور کلی الگوی زهکشی رواناب سطحی در سایت پتروشیمی به صورت شمالی-جنوبی و شرقی-غربی بوده به نحوی که رواناب سطحی قسمت شمالی پس از پخش‌شدگی در مرکز و قسمت جنوبی سایت



شکل ۷. ارتباط کارست‌های گچی با منابع آب‌های سطحی محدوده مورد مطالعه، (a) رقومی سازی محدوده مورد مطالعه 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 شناسایی شده 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

نزدیک سطح زمین هستند و عمدتاً از نظر ابعاد کوچک‌اند و بالای سطح آب قرار گرفته‌اند و موقعیت گمانه‌های حفره‌دار، تطابق خوبی با الگوی زهکشی دارند. از آنجاکه تشکیل این حفرات مربوط به نفوذ آب‌های سطحی به عمق و انحلال گچ در خاک بوده بنابراین انتظار می‌رود حفره‌های دیگری در

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

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.

اطراف مسیر آب وجود داشته باشد. در شمال و شمال شرق سایت پروژه برخی از حفره‌ها در بالای سطح آب تشکیل شده 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 تشکیل شده 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 از آنجاکه 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، ۱- نقشه‌های پهنه‌بندی SPT، ۲- نقشه‌های پهنه‌بندی



شکل ۹. لایه‌بندی پیچیده به همراه جنس متنوع مصالح در ترانشه مجاور سایت پتروشیمی مسجدسلیمان

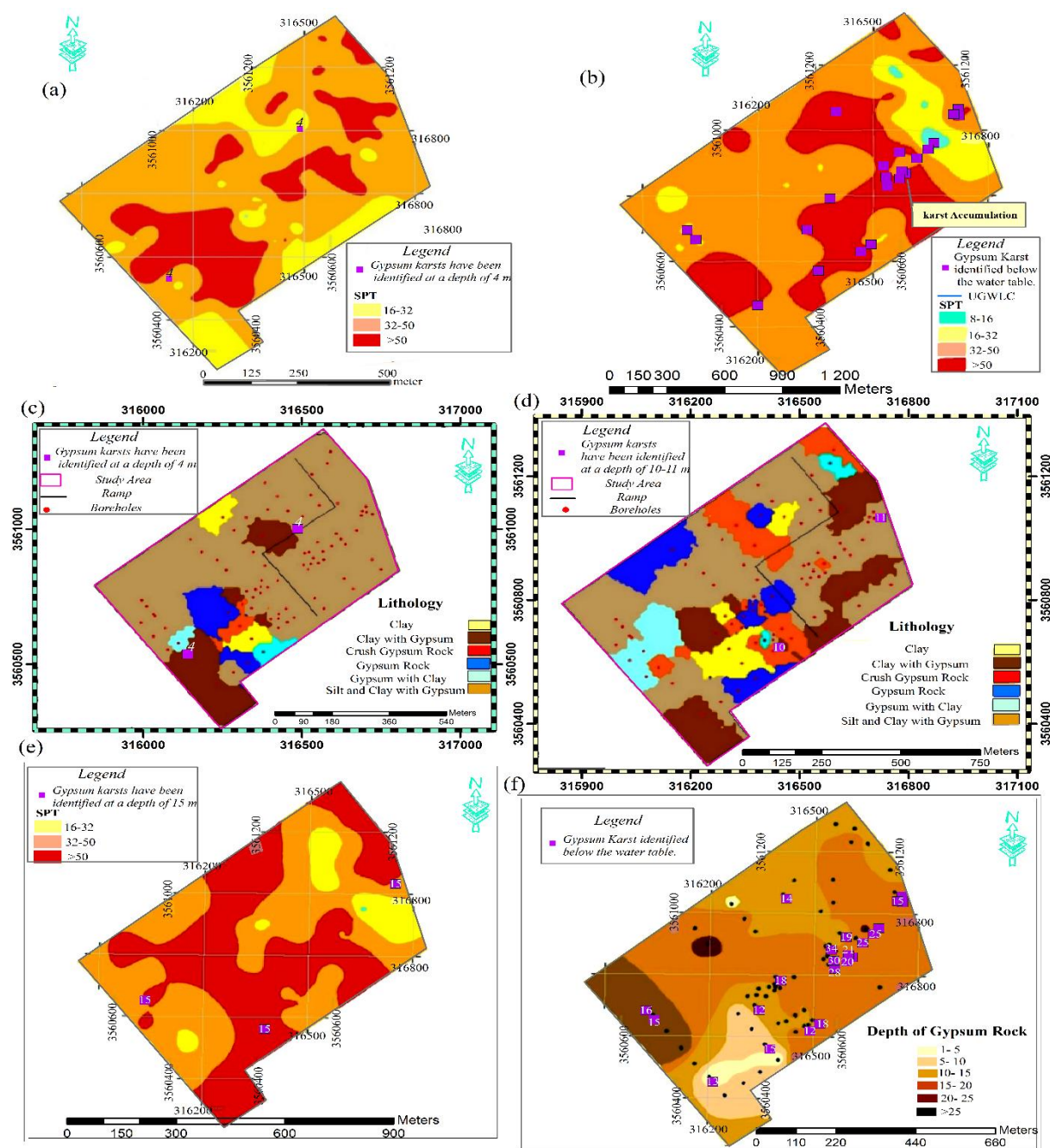
Fig 9. The trench near the Masjed Soleyman petrochemical site with features complex layering and varied lithology.

سازند گچساران ناشی از انحلال ژئوپس در اثر جریان آب زیرزمینی می‌باشد (شکل ۱۰-۱۰e).

درمجموع با پیاده‌سازی موقعیت کارست‌های گچی شناسایی شده در زیر تراز سطح ایستابی بر روی نقشه مقادیر SPT در عمق ۱۰/۵ متر (تراز نماینده سطح ایستابی) (شکل ۱۰-۱۰b) و نقشه پهنه‌بندی سنگ‌بستر (شکل ۱۰-۱۰f) می‌توان دریافت با افزایش عمق از میزان گستردگی لیتولوژی سیلت و رس گچ دار کاسته می‌شود و جای خود را به سنگ ژئوپس 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 ژئوپس، می‌توان مجدد حضور آب زیرزمینی و جهت جریان آن را عامل اصلی تشکیل کارست‌های گچی در منطقه دانست.

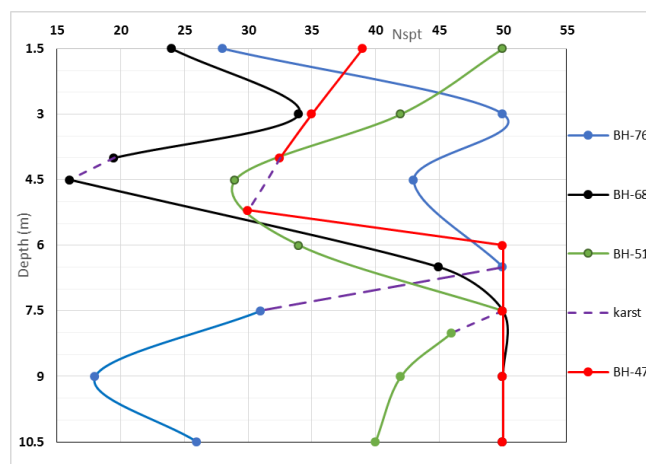
درنهایت با توجه به اینکه آزمایش نفوذ استاندارد بر روی خاک صورت می‌گیرد و نتایج آن برای مصالح سنگی قابل‌اعتماد نمی‌باشد و اعداد SPT در حضور آب و فشار منفذی نیاز تصحیح دارند. بنابراین مطابق شکل ۱۱، تغییرات عدد نفوذ SPT، تا عمق ۱۰/۵ متر نسبت به عمق در گمانه‌های کارست‌دار مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید 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).

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. به‌نحوی که اگرچه کارست‌های گچی شناسایی شده 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 ۱۰-۱۰a, c). 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 ژئوپس می‌باشد به‌بیان‌دیگر حضور مصالح سنگ ژئوپس و انیدریت منجر به ثبت ارقام بالای SPT شده است (شکل‌های ۱۰-۱۰d). چنانچه پیاده‌سازی دو حفره شناسایی شده به ترتیب در ترازهای ۱۰ و ۱۱ متر بر روی نقشه لیتولوژی آن عمق (شکل ۱۰-۱۰d) حاکی از قرارگیری آن‌ها در میان لایه‌های سنگ ژئوپس خردشده و لایه سیلت و رس سازند گچساران ناشی از تغییرات سطح ایستابی می‌باشد. همچنین پیاده‌سازی سه مورد کارست‌های گچی شناسایی شده در عمق ۱۵ متر (زیر سطح ایستابی) بر روی نقشه پهنه‌بندی مقادیر SPT در این عمق حاکی از شکل‌گیری کارست‌های گچی در میان لایه‌های سنگ ژئوپس



شکل ۱۰. رقمی‌سازی کارست‌های گچی شناسایی شده، (a) در عمق ۴ متری بر روی نقشه پهنه‌بندی مقادیر SPT در عمق ۴/۵ متر، (b) زیر سطح ایستایی 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 ۱۰-۱۱ 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 ایستایی بر روی نقشه پهنه‌بندی سنگ‌بستر محدوده مورد مطالعه

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.



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 فصل تر 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 مورد مطالعه

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	X: 316555	X: 316250	X: 315998	X: 316690	-
	Y:3560642	Y:3561290	Y:3560408	Y:3560720	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

همچنین با توجه به میانگین مقدار سولفات آب زیرزمینی (مقدار 1480 ppm) 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 350 Kg/m^3 و نسبت آب به سیمان باید کمتر از 0.5 باشد) یا سیمان نوع V (میزان سیمان باید بیشتر از 340 Kg/m^3 و نسبت محتوای آب به سیمان باید کمتر از 0.5 باشد) استفاده گردد. علاوه بر اساس استاندارد طراحی بتن که حداکثر مقدار کلرید مجاز را برای غلظت تهاجمی 500 (ppm) و مقدار pH را $8.5 - 5$ بیان می‌کند، مقادیر کلرید و اسیدیته آب در محدوده مجاز واقع شده‌اند 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 با قدرت 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 ایستایی 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 گاهی مشکل می‌باشد. از آنجاکه 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. علاوه 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 ژپس 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 ایستایی 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 قرار گرفته‌اند و موقعیت گمانه‌های حفره‌دار، تطابق خوبی با الگوی زهکشی دارند. از آنجاکه 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 تشکیل شده 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 خرد شده و گچ‌ها به دلیل تماس جریان آب زیرزمینی تشکیل شده است. علاوه بر این انطباق کارست‌های گچی شناسایی شده 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 ایستایی) 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. در نهایت 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 مورد مطالعه 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 شناسایی شده با تزریق ملات، غیر واگرا، ضد شسته شدن و دارای قابلیت گیرش سریع و کم‌تحرك 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 ژئیس، 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، درعین حال 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 در نهایت 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.

References

- Abbaspour, S., Daavi, H., & Feli, J. (2008). Operational method of constructed canals of irrigation and drainage network in gypsum soils. In 1st 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)

- Brune, G. (1965). Anhydrite and gypsum problems in engineering geology. *Engineering Geology*, 2(1), 26-38.
- Cailleux, J., & Toulemon, 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.
- Descloîtres, M., Guérin, R., Ramirez, E., Gallaire, 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.
- Gołębowski, T., & Jarońska, 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*

- Geomorphology, Academic Press, San Diego, CA, Karst, Geomorphology, 6, 425-437.
- Gutierrez, F., Calaforra, J.M., Cardona, F., Orti, 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 Investigations. 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 gypsiferous soils of Masjed Soleyman petrochemical plant site with emphasis 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., Gołębowski, 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 (geotectonics relations, distribution, and major peculiarities). Obshchiye voprosi karstovedeniya: 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)

- 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
- Rashyadian, 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 delta, 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

- 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.